



<https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0394>

## HYDROGEOLOGY AND HYDROGEOCHEMISTRY OF THE ZAELTSOVSKO-MOCHISHCHENSKY ZONE OF RADON WATERS IN THE SOUTHERN WEST SIBERIA

D. A. Novikov<sup>1, 2</sup>, A. F. Sukhorukova<sup>1, 2</sup>, T. V. Korneeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

**Abstract:** The study aims at solving the fundamental and applied problems of hydrogeology and hydrogeochemistry of the Zaeltsovsko-Mochishchensky zone of radon waters in the northwestern district of the city of Novosibirsk. Novosibirsk is one of the few Russian cities built on granites that emit radon ( $^{222}\text{Rn}$ ). In geological terms, the study area is confined to the NW near-contact zone of the large Novosibirsk granitoid massif. The available data on radon in this area has not been scientifically consolidated yet. We used the methods of S.L. Shvartsev, N.M. Kruglikov, V.V. Nelyubin, O.N. Yakovlev, and V.M. Matusевич and software packages Visual Minteq, PhreeQC, WATEQ4f and HG-32 and obtained physical and chemical calculations for the forms of migration of trace elements in radon waters and estimated the degrees of radon water saturation with rock-forming minerals. The data from hydrogeological profiles and hydrogeochemical sampling (118 samples from 57 water wells and sources) were analyzed. Radon waters are fissure-type, cold (6–10 °C) and occur at a depth of 50–200 m. By their chemical composition (according to the classification proposed by S.A. Shchukarev), the waters are mainly hydro-carbonate calcium and hydro-carbonate calcium-sodium; the total mineralization amounts to 322–895 mg/dm<sup>3</sup>. All the water wells drilled in granites and near-contact hornfels were tested for radon. It is revealed that the  $^{222}\text{Rn}$  concentration in water varies widely, from 11 to 801 Bq/dm<sup>3</sup>. Therefore, such waters are classified as low-radon and moderate-radon mineral waters (according to the classification proposed by N.I. Tolstikhin). In the wells drilled in hornfels, the  $^{222}\text{Rn}$  concentration in water is 37–241 Bq/dm<sup>3</sup>. The concentrations of  $^{238}\text{U}$  and  $^{226}\text{Ra}$  do not exceed 0.098 and  $1.9 \cdot 10^{-9}$  mg/dm<sup>3</sup>, respectively. Physicochemical simulation shows that  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  migrate mainly as free ions, while  $\text{Be}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Zr}^{4+}$ ,  $\text{Ti}^{4+}$  migrate as hydroxide complexes. Uranium is mainly present in uranyl-carbonate complexes of calcium:  $\text{Ca}_2\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3(\text{aq})$  (61–75 %) and  $\text{CaUO}_2(\text{CO}_3)_3^{2-}$  (25–36 %). Calculations show abundant saturation of the waters with calcite, dolomite, ferrihydrite, greenalite, hausmannite, manganite, quartz, rutile, siderite, lepidocrocite, goethite, and pyrolusite. The mineral phases, such as aragonite, barite, chalcedony, cristobalite, vaterite, and amorphous silicon dioxide are in equilibrium. Several samples show saturation of the waters with relatively rare phosphorus-containing minerals: hydroxyapatite, manganese hydrogen phosphate, cerargyrite, and lead molybdate. The radon waters are not saturated with monohydrocalcite, calcium molybdate, celestite, chrysotile, copper hydroxide, copper molybdate, epsomite, huntite, amorphous and crystalline iron hydroxide (II), gypsum, iron molybdate (II), magnesite, lansfordite, Na-jarosite, nesquehonite, powellite, strontianite, tenorite, witherite, and zirconium dioxide.

**Key words:** radon water; hydrogeological conditions; granite intrusion; form of migration; saturation indice; Zaeltsovsko-Mochishchensky zone; Novosibirsk city; West Siberia

### RESEARCH ARTICLE

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на Всероссийском совещании по подземным водам Востока России (Новосибирск, 18-24 июня 2018 г.)

**Received:** October 10, 2018

**Revised:** November 1, 2018

**Accepted:** November 14, 2018

**For citation:** Novikov D.A., Sukhorukova A.F., Korneeva T.V., 2018. Hydrogeology and hydrogeochemistry of the Zaeltsovsko-Mochishchensky zone of radon waters in the southern West Siberia. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (4), 1255–1274. doi:10.5800/GT-2018-9-4-0394.

**Для цитирования:** 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. doi:10.5800/GT-2018-9-4-0394.

# ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ГИДРОГЕОХИМИЯ ЗАЕЛЬЦОВСКО-МОЧИЩЕНСКОГО ПРОЯВЛЕНИЯ РАДОНОВЫХ ВОД (ЮГ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

Д. А. Новиков<sup>1,2</sup>, А. Ф. Сухорукова<sup>1,2</sup>, Т. В. Корнеева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** Актуальность исследований состоит в решении фундаментальных и прикладных вопросов гидрогеологии и гидрогеохимии Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод в северо-западной части г. Новосибирска. Новосибирск относится к числу тех немногих городов России, которые были заложены на гранитах – источнике эманации радона ( $^{222}\text{Rn}$ ). В геологическом отношении изучаемая территория приурочена к северо-западной приконтактной зоне крупного Новосибирского гранитоидного массива. Научные обобщения имеющегося фактического материала практически не проводились. На основании методических приемов С.Л. Шварцева, Н.М. Кругликова, В.В. Нелюбина, О.Н. Яковлева, В.М. Матусевича с применением программных комплексов Visual Minteq, Phreeqc, WATEQ4f и HG-32 выполнены физико-химические расчеты форм миграции микроэлементов в радоновых водах и степени их насыщения породообразующими минералами. Фактический материал представлен сведениями о гидрогеологических параметрах разреза и результатах гидрогеохимического опробования 57 водопунктов (скважины и источники) (118 проб). Радоновые воды – трещинные, холодные, с температурой 6–10 °С, залегают на глубинах 50–200 м. Воды по химическому составу (по классификации С.А. Щукарева) преимущественно гидрокарбонатного кальциевого и гидрокарбонатного кальциево-натриевого состава с величиной общей минерализации 322–895 мг/дм<sup>3</sup>. Все скважины, вскрывшие граниты и приконтактные роговики, были опробованы на содержание в воде  $^{222}\text{Rn}$ , концентрации которого варьируются в широких пределах – от 11 до 801 Бк/дм<sup>3</sup>, т.е. по содержанию  $^{222}\text{Rn}$  воды относятся к слаборадоновым и умеренно радоновым, минеральным (по классификации Н.И. Толстихина). В скважинах, вскрывших роговики, концентрация радона в воде составляет 37–241 Бк/дм<sup>3</sup>. Содержания  $^{238}\text{U}$  и  $^{226}\text{Ra}$  не превышают 0.098 и  $1.9 \cdot 10^{-9}$  мг/дм<sup>3</sup> соответственно. Методами физико-химического моделирования установлено, что  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  мигрируют в основном в форме свободных ионов, а  $\text{Be}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Zr}^{4+}$ ,  $\text{Ti}^{4+}$  – в виде гидроксидных комплексов. Формы нахождения урана представлены преимущественно уранил-карбонатными комплексами кальция  $\text{Ca}_2\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3(\text{aq})$  (61–75 %) и  $\text{CaUO}_2(\text{CO}_3)_3^{2-}$  (25–36 %). Расчеты выявили повсеместное насыщение вод относительно кальцита, доломита, ферригидрита, гриналита, гаусманита, манганита, кварца, рутила, сидерита, лепидокрокита, гётита, пиролюзита. В равновесии находятся такие минеральные фазы, как арагонит, барит, халцедон, кристобалит, фатерит, аморфный диоксид кремния. В отдельных пробах наблюдается насыщение вод относительно редких фосфоросодержащих минералов – гидроксипатита, гидроортофосфата марганца, керагирита и молибдата свинца. Радоновые воды не насыщены по отношению к моногидрокарбонату, молибдату кальция, целеститу, хризотилу, гидроксиду меди, молибдату меди, эпсомиту, гунтиту, аморфному и кристаллическому гидроксиду железа (II), гипсу, молибдату железа (II), магнезиту, лансфордиту, натриевому ярозиту, несквегониту, повеллиту, стронцианиту, тенориту, витериту и диоксиду циркония.

**Ключевые слова:** радоновые воды; гидрогеологические условия; гранитная интрузия; форма миграции; индекс насыщения; Заельцовско-Мочищенская зона; город Новосибирск; Западная Сибирь

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В зависимости от геологических и гидрогеологических условий в различных регионах Земли сложились предпосылки для формирования широкого спектра фоновых концентрации радона ( $^{222}\text{Rn}$ ). Исследования по изучению содержания радона в природных водах ведутся достаточно широко многими научными коллективами в США, России, Болгарии, Германии, Испании, Италии, Вен-

грии, Китае, Турции, Иране и т.д. Концентрации радона в природных водах колеблются от 1 до 100000 Бк/дм<sup>3</sup> и более [Posokhov, Tolstikhin, 1977; Hoehn, von Gunten, 1989; Matveev et al., 1996; Duenas et al., 1998; Böhm, 2002; Yafasov A.Ya., Yafasov A.A., 2003; Bertolo, Bigliotto, 2004; Voronov, 2004; Beitollahi et al., 2007; Eliseev, 2010; Chaudhuri et al., 2010; Gurler et al., 2010; Didenko, 2011; Erőss et al., 2012; Santos, Bonotto, 2014; Alonso et al., 2015; Kamenova-Totzeva et al., 2015; Kies et al., 2015; Gavrilkina, 2016]. Наряду с районами с



**Рис. 1.** Местоположение района исследований.

**Fig. 1.** Schematic map showing the study area.

пониженными фоновыми концентрациями  $^{222}\text{Rn}$  в водах имеются территории с весьма высокими, ураганскими, содержаниями. Такие регионы выявлены в Бразилии, Индии, Канаде, Турции и т.д. [Böhm, 2002; Gurler et al., 2010]. В Иране известны родники с высокими концентрациями радона [Beitollahi et al., 2007]. Повышенными фоновыми концентрациями радона характеризуются скандинавские страны. В России выявлены зоны с концентрацией радона в воде в 300–400 Бк/дм<sup>3</sup> и более [Voronov, 2004]. Так, например, на Ильменском хребте (Южный Урал) имеются радоновые источники с высокой эманацией – до 2000 Бк/дм<sup>3</sup> [Gavrilkina, 2016]. Наименее изученными радоновыми водами в России следует считать 12 проявлений в пределах Новосибирской агломерации; Заельцовско-Мочищенское не является исключением (рис. 1). В имеющейся научной литературе, даже в обобщающих монографиях «Минеральные воды (лечебные, промышленные, энергетические)» [Posokhov, Tolstikhin, 1977] и «Геологическое строение и полезные ископаемые Западной Сибири (Новосибирская, Омская, Томская области)» [Varkasin et al., 1998], приводятся лишь скудные сведения о их химическом составе и концентрациях радона, радия и урана [Verigo et al., 1979; Gusev, Verigo, 1984;

Roslyakov et al., 2013]. История их изучения связана с широкомасштабными поисками урана в Центральной Сибири, которые были начаты еще в 1945 г. СУ «Енисейстрой» МВД СССР, и открытием затем Березовской экспедицией Пригородного месторождения в окрестностях г. Новосибирска [Dolgushin, Tsaruk, 2015; Tsaruk, Dundukov, 2015].

Заельцовско-Мочищенская зона протягивается вдоль западной и северо-западной окраины г. Новосибирска (рис. 1). В геологическом отношении район приурочен к северо-западной приконтактной зоне крупного Новосибирского массива верхнепалеозойских гранитоидов, прорывающих породы инской серии верхнего девона – нижнего карбона. Эти отложения представлены глинистыми сланцами, песчаниками, разбитыми системой трещин. Вблизи контакта гранитного массива и даек интрузий со вмещающими породами отложения превращены в роговики. Палеозойские образования перекрыты рыхлыми четвертичными отложениями мощностью до 50 м. Местами в пойме р. Оби они выходят на дневную поверхность. Гидрогеологические условия города определяются наличием вод палеозойского фундамента и четвертичных отложений.

В 1970–1980 гг. Заельцовским отрядом Новосибирской геолого-поисковой экспедиции под руко-

водством И.П. Карпицкого и Г.Л. Самсонова были проведены поисковые и разведочные работы на радоновые воды для использования их в лечебных целях. В эти годы поиски радоновых вод связаны с именами гидрогеологов ПГО «Новосибирскгеология» Е.К. Вериги, Н.К. Ахмеджановой, Б.Л. Врабий, Е.Г. Куксовой, Г.Т. Костенко, Н.А. Плаксиной, П.Л. Макидон, Л.Н. Косс, В.А. Жуковского, И.П. Карпинского и других. Скучные опубликованные данные говорят о том, что радоновые воды приурочены к гранитоидным интрузиям Томь-Колыванской складчатой зоны (КТСЗ). Воды – трещинные, холодные (6–10 °С), залегают на глубинах 50–200 м. Воды по химическому составу (по классификации С.А. Щукарева) преимущественно гидрокарбонатного кальциевого и гидрокарбонатного кальциево-натриевого состава с величиной общей минерализации 322–895 мг/дм<sup>3</sup>. В 1980–1990 гг. в Новосибирске и его окрестностях были выявлены радоновые воды более десяти месторождений для лечебных целей (самые известные: для санатория «Заельцовский Бор», Горводолечебницы, профилактория завода химконцентратов). В настоящее время радоновые воды в городе практически не используются, за исключением муниципальной клинической больницы № 34, где сохранилась действующая скважина и в лечении применяются радоновые ванны. Выявленные месторождения радоновых вод Новосибирской агломерации представляют собой достаточно водообильные зоны с концентрациями радона от 27 до 4784 Бк/дм<sup>3</sup>. Весь фактический материал сведен в электронную базу данных и содержит сведения о гидрогеологических параметрах разреза и результатах гидрогеохимического опробования 57 водопунктов (скважины и источники). Общий массив гидрогеохимических данных по Заельцовско-Мочищенской зоне составляет 118 проб, а информационный банк по радоновым водам Новосибирской городской агломерации – более 800 записей. Следует отметить, что гидрогеохимические материалы были получены за длительный период времени, поэтому были применены методы статистического анализа по водопунктам, изученным в разные годы для оценки достоверности фактических данных (аномальные пробы из выборки были исключены). Рассмотрение и интерпретация гидрогеохимических данных проводились с применением программных средств Microsoft Excel, STATISTICA, SURFER, Grid Master. В среде программных комплексов Visual Minteq, PhreeqC, WATEQ4f и HG-32 выполнены физико-химические расчеты форм миграции микроэлементов в радоновых водах и степени их насыщения по отношению к порообразующим минералам (алюмосиликатам, силикатам, карбонатам, сульфатам, хлоридам, окислам и гидроокислам).

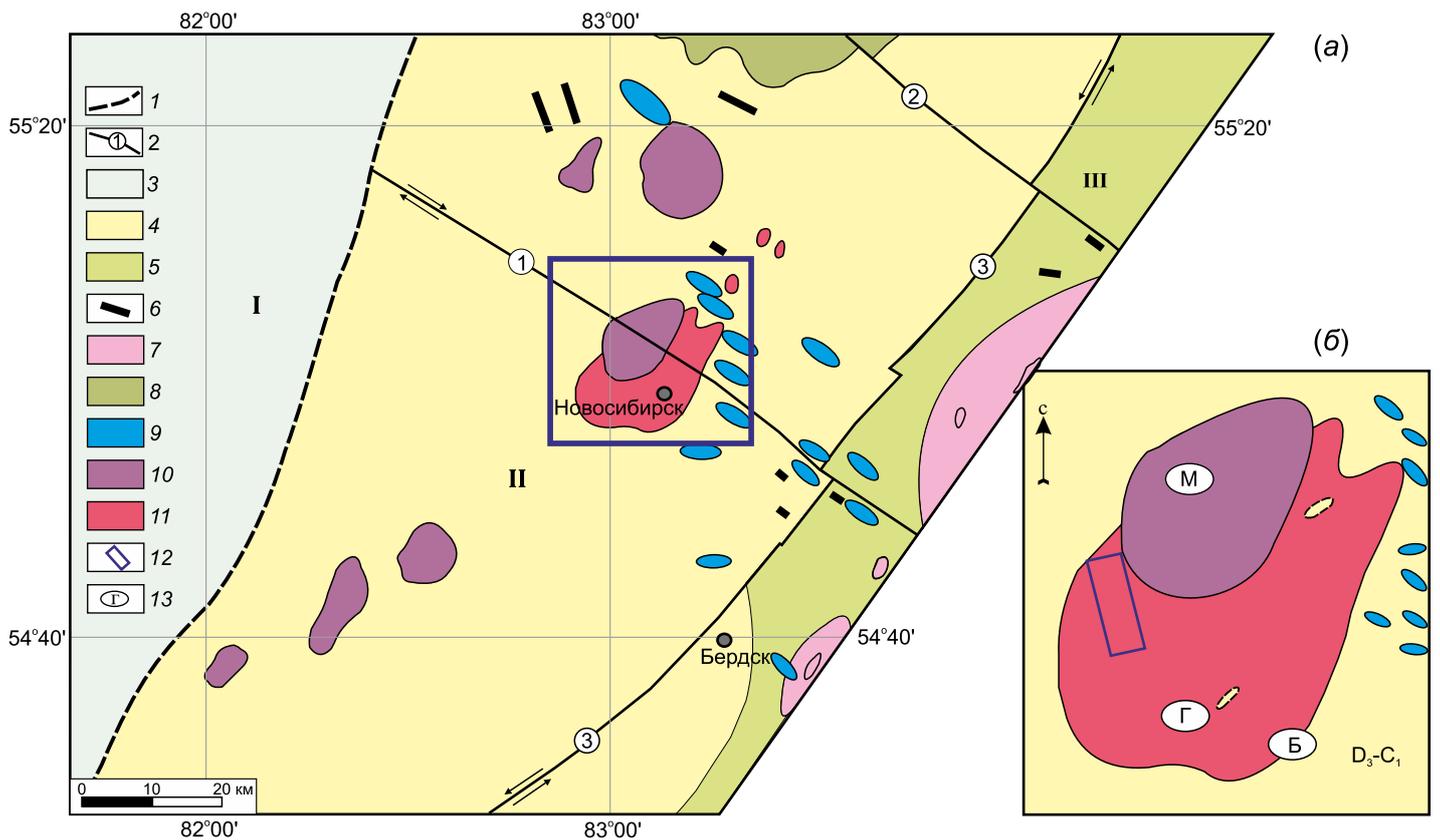
## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 2.1. ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ НОВОСИБИРСКОГО ГРАНИТНОГО МАССИВА

В геологическом отношении изучаемая территория приурочена к северо-западной приконтактовой зоне крупного Новосибирского гранитоидного массива. Первые сведения о гранитах Новосибирского Приобья и предположительном их возрасте, относящиеся к концу XIX в., содержатся в работах А.Н. Державина, И.Д. Черского, Г.Г. Петца, А.А. Иностранцева [Kuzmin, Parshin, 1976]. В 30-е гг. прошлого века изучением магматических образований занимались М.К. Бельштерли [Belshterli, 1933] и А.И. Гусев [Gusev, 1934]. Следующий этап их изучения приходится на 60–70 гг. [Moiseenko et al., 1966; Nuvarieva, 1968; Matveevskaya, 1969; Kozlov, 1971]. В последние годы сотрудниками ИГМ СО РАН, ТГУ и СНИИГГиМС были проведены детальные петрогеохимические и геохронологические исследования магматических пород [Sotnikov et al., 1999; Vladimirov et al., 2001; Fedoseev et al., 2001; Nebera, 2010; Babin et al., 2014].

Гранитоидные массивы Новосибирского Приобья размещаются в центральной части северо-западного фаса Колывань-Томской складчатой зоны (КТСЗ) (рис. 2), являющейся северо-западным окончанием Алтае-Саянской полиаккреционной области, представляющей в тектоническом отношении сложнопостроенную чешуйчато-блоковую структуру [Distanov et al., 2006]. КТСЗ сложена породами среднего девона – раннего карбона, которые простираются в северо-восточном направлении 30–60°, т.е. под прямым углом к структурам Западного Салаира [Kalinin et al., 1999; Roslyakov et al., 2001].

Разрывные нарушения играют важную роль в формировании, развитии и размещении тектонических структур изучаемого района. К главным типам разрывных структур рассматриваемой территории относятся разновозрастные региональные глубинные и локальные нижнекоровые и коровые разломы. Они контролируют строение и пространственное размещение главных типов складчатых структур, расположение в них разновозрастных вулканических, субвулканических, интрузивных комплексов и связанных с ними полезных ископаемых [Roslyakov et al., 2001]. По геофизическим данным и дешифрированным космоаэрофотоснимкам фрагменты проходящего на исследуемой территории Западно-Салаирского разлома и сопровождающих его разрывов трассируются в северо-западном направлении в основании КТСЗ [Surkov et al., 1986; Roslyakov et al., 2001]. Распространение в пределах разломов базальтовых и гранитоидных маг-



**Рис. 2.** Фрагмент карты главных геологических комплексов и тектонических структур области сочленения Салаира и Колывань-Томской складчатой зоны (по [Roslyakov et al., 2001]) (а) и местоположение Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод в пределах Новосибирского гранитоидного массива (б).

1 – граница средне- и позднепалеозойских структур КТСЗ и мезозойского чехла Западно-Сибирской плиты; 2 – разрывные структуры (разломы, надвиги, сдвиги) (цифры в кружках): 1 – Западно-Салаирский, 2 – Доронинский, 3 – Ярко-Орской; 3–11 – структурно-вещественные комплексы: 3 – терригенные (Mz), 4 – задуговые морские карбонатно-терригенные глинистые (D<sub>3</sub>-C<sub>1</sub>), 5 – окраинно-континентальные прибрежно-морские карбонатно-терригенные (D<sub>3</sub>-C<sub>1</sub>), 6 – коллизионные пикрит-габбро-долеритовый субвулканический (P<sub>2</sub>), 7 – вулканогенные плагиориолит-андезит-базальтовые (D<sub>2</sub>-D<sub>3</sub>), 8 – коллизионные гранит-граносиенит-гранодиоритовый мезоабиссальные (P<sub>2</sub>:T<sub>1</sub>), 9 – мезозойские рифтогенные внутриплитные лампрофир-долеритовые (T<sub>1-2</sub>), 10 – мезозойские рифтогенные внутриплитные гипабиссальные лейкократовых гранитов (T<sub>2-3</sub>), 11 – коллизионные гипабиссальные диорит-тоналит-гранитовые (T<sub>1-2</sub>); 12 – местоположение Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод; 13 – карьеры: М – Мочищенский, Г – Горский, Б – Борок. Структуры: I – юго-восточная окраина Западно-Сибирской плиты, II – Новосибирский прогиб, III – Митрофановско-Буготакское поднятие.

**Fig. 2.** Fragment of the map showing the main geological complexes and tectonic structures at the junction of the Salair and Kolyvan-Tomsk folded zone (after [Roslyakov et al., 2001]) (a). Location of the Zaeltsovsko-Mochishchensky zone of radon waters in the Novosibirsk granitoid massif (b).

1 – boundary between the Middle and Late Paleozoic structures of the Kolyvan-Tomsk folded zone (KTCZ) and the Mesozoic nappe of the West Siberian plate; 2 – faults, thrusts, shear faults (numbers in circles): 1 – West Salair, 2 – Doroninsky, 3 – Yarsko-Orsky; 3–11 – structural-material complexes: 3 – terrigenous (Mz), 4 – back-arc marine carbonate-terrigenous clayey (D<sub>3</sub>-C<sub>1</sub>), 5 – marginal-continental coastal-marine carbonate-terrigenous (D<sub>3</sub>-C<sub>1</sub>), 6 – collisional picrite-gabbro-dolerite subvolcanic (P<sub>2</sub>), 7 – volcanic plagioclite-andezite-basalt (D<sub>2</sub>-D<sub>3</sub>), 8 – collisional granite-granosyenite-granodiorite meso-abyssal (P<sub>2</sub>:T<sub>1</sub>), 9 – Mesozoic riftogenic intraplate lamprophyre-dolerite (T<sub>1-2</sub>), 10 – Mesozoic riftogenic intraplate hypabyssal leucocratic granites (T<sub>2-3</sub>), 11 – collisional hypabyssal diorite-tonalite-granite (T<sub>1-2</sub>); 12 – Zaeltsovsko-Mochishchensky zone of radon waters; 13 – quarries: M – Mochishchensky, G – Gorsky, B – Borok. Structures: I – SE margin of the West Siberian plate, II – Novosibirsk depression, III – Mitrofanov-Bugotak uplift.

матических пород при отсутствии гипербазитов свидетельствует о их коровой природе.

Выделены и детально охарактеризованы два гранитоидных комплекса – приобский (трехфазный) и барлакский (двухфазный) [Sotnikov et al., 1999; Babin et al., 2014]. В состав первого входят Об-

ской и Новосибирский, в состав второго – Барлакский, Колыванский, Сенчанский и другие массивы. Гранитоиды этих комплексов достаточно уверенно различаются уже при традиционных геологических исследованиях – по минеральному составу, структурно-текстурным и геохимическим особенностям.

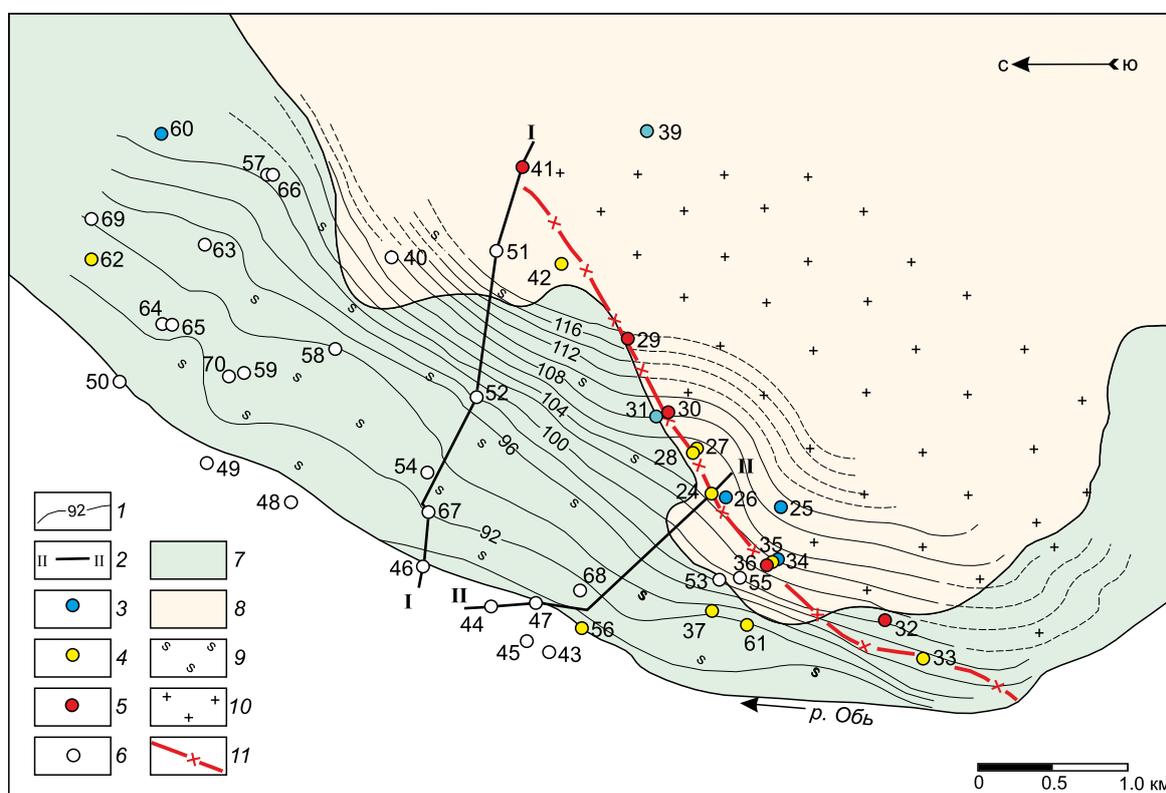
Первые имеют гранит-гранодиорит-граносиенитовый состав, директивные текстуры, большое разнообразие структур, изменчивость вещественного состава, интенсивное ороговикование вмещающих пород, слабовыраженный дефицит европия. Вторые характеризуются монотонным гранит-лейкогранитовым составом, массивными текстурами, постоянным присутствием флюорита и глубоким европиевым минимумом. Значимые различия редкоэлементного состава пород двух комплексов наблюдаются по содержаниям цезия, гафния и таллия, по соотношению урана и тория, по разному уровню концентраций тяжелых лантаноидов, по железистости и фтористости биотитов, а также по металлогенической специализации [Sotnikov et al., 2000].

Граниты исследуемой Заельцовско-Мочищенской зоны в результате детальных петрографиче-

ских, геохимических и радиологических исследований, как отмечалось выше, относятся к приобскому интрузивному комплексу. Они прорывают нерасчлененные отложения верхнего девона – нижнего карбона. Изохронный Rb-Sr возраст гранитоидов по биотитам и породам –  $255 \pm 3.1$  млн лет, что соответствует границе верхней перми – нижнего триаса. Породы комплекса выделяются в гранит-граносиенит-гранодиоритовую формацию [Kalinin et al., 1999; Roslyakov et al., 2001].

## 2.2. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ЗАЕЛЬЦОВСКО-МОЧИЩЕНСКОГО ПРОЯВЛЕНИЯ РАДОНОВЫХ ВОД

В гидрогеологическом разрезе Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод можно выделить два водоносных комплекса (рис. 3, рис. 4)



**Рис. 3.** Гидрогеологическая карта Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод (г. Новосибирск).

1 – гидроизогипсы первого от поверхности водоносного горизонта; 2 – линии гидрогеологических разрезов (рис. 4); 3–6 – поисковые скважины, с данными по концентрации радона в воде (Бк/дм<sup>3</sup>): 3 – <100, 4 – 100–300, 5 – >300, 6 – нет сведений; 7–8 – первый от поверхности водоносный горизонт: 7 – современных аллювиальных отложений поймы и верхнечетвертичных отложений I и III надпойменных террас р. Оби, 8 – нижне- и среднечетвертичных субаэральных отложений красnodубровской свиты; 9–10 – водоносная зона трещиноватости: 9 – верхнедевонско-нижнекаменноугольных роговиков, 10 – верхнепалеозойских гранитов; 11 – контакт гранитного массива с роговиками.

**Fig. 3.** Hydrogeological map of the Zaeltsovsko-Mochishchensky zone of radon water (Novosibirsk city).

1 – hydroisohypses of the aquifer (first from the surface); 2 – lines of hydrogeological profiles (see Fig. 4); 3–6 – prospecting wells, and radon concentrations in water (Bq/dm<sup>3</sup>): 3 – <100, 4 – 100–300, 5 – >300, 6 – no data; 7–8 – aquifer (first from the surface): 7 – modern alluvial deposits of the floodplain and Upper Quaternary sediments I and III of the terraces above the floodplain of the Ob river, 8 – Lower and Mid-Quaternary subaerial deposits of the Krasnodubrovsky suite; 9–10 – water-saturated zone of fracturing: 9 – Upper Devonian – Lower Carboniferous hornfels, 10 – Upper Paleozoic granites; 11 – contact of the granite massif with the hornfels.

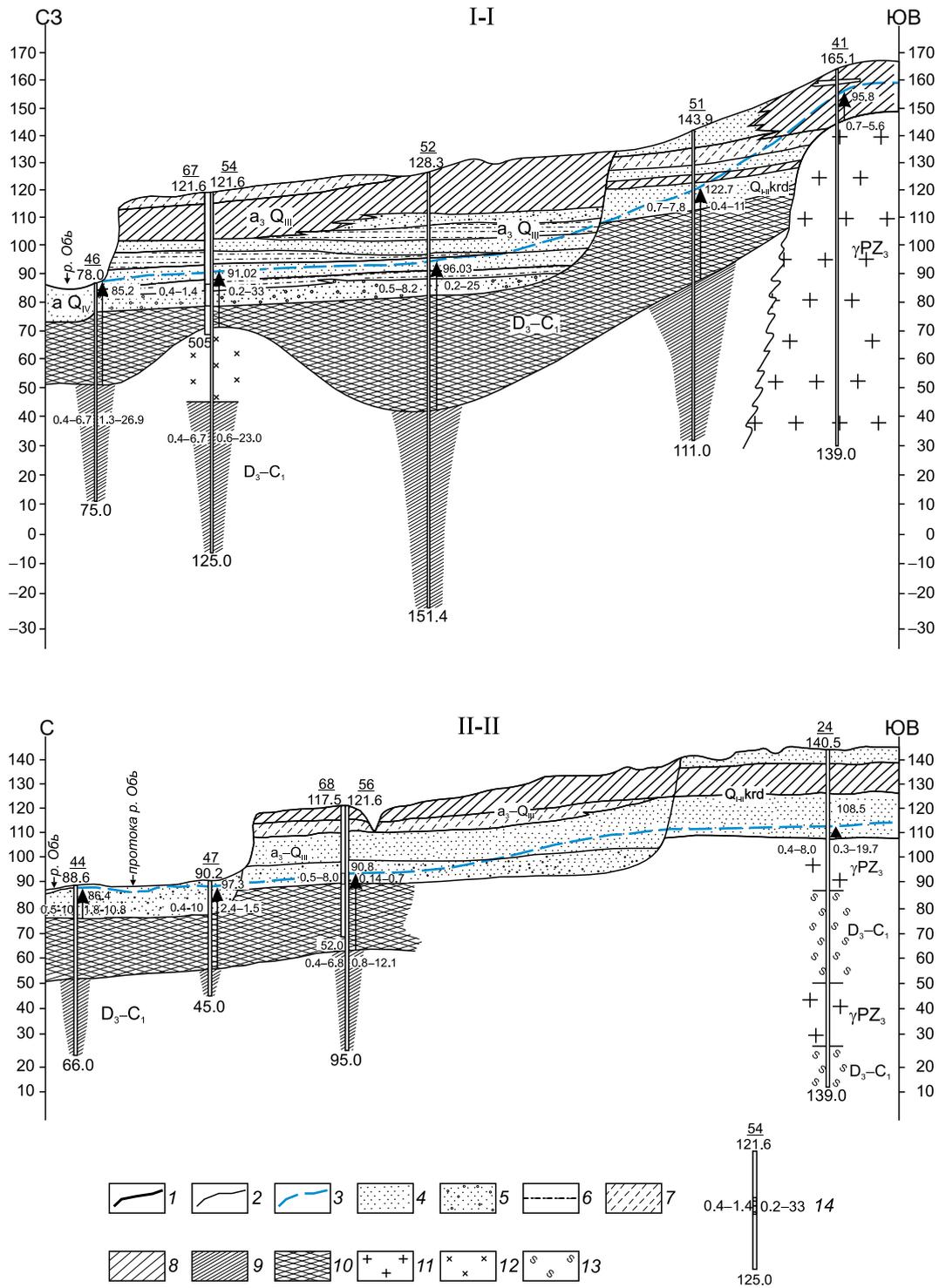


Рис. 4. Гидрологические разрезы по линиям I – I и II – II.

1-2 – границы: 1 – стратиграфические, 2 – литологические; 3 – уровень подземных вод; 4-13 – литологический состав пород: 4 – пески, 5 – галечники с крупнозернистым песком, 6 – пески мелкозернистые глинистые, 7 – супеси, 8 – суглинки, 9 – глинистые сланцы, алевролиты, 10 – глины коры выветривания, 11 – граниты, 12 – диориты, 13 – роговики; 14 – скважина гидрогеологическая. Цифры сверху: в числителе – номер скважины на карте, знаменателе – абсолютная отметка устья скважины, м. Цифры справа: первая – дебит, л/с; вторая – понижение уровня, м. Цифры слева: первая – минерализация, г/дм<sup>3</sup>; вторая – температура, °С. Снизу – глубина скважины, м. Штриховка соответствует интервалу посадки фильтра.

Fig. 4. Hydrological profiles along lines I – I and II – II.

1- stratigraphic boundaries; 2 – lithological boundaries; 3 – groundwater level; 4-13 – lithological composition of rocks: 4 – sand, 5 – pebble with coarse-grained sand, 6 – fine-grained clay sands, 7 – sandy loam, 8 – loam, 9 – shale, siltstones (aleurolites), 10 – gouge, 11 – granites, 12 – diorites, 13 – hornfels; 14 – hydrogeological well. Numbers (top): numerator – well number in the map, denominator – absolute elevation of the wellhead, m. Numbers (right): first – flow rate, l/sec, second – level gradient, m. Numbers (left): first – mineralization, g/dm<sup>3</sup>, second – temperature, °C. Bottom – well depth, m. Hatching marks the interval of the filter seat.

[Sukhorukova, Novikov, 2018]. Первый объединяет четвертичные отложения, второй – породы палеозойского фундамента. Такие гидрогеологические условия часто развиты в прибортовых районах артезианских бассейнов [Novikov, 2005, 2017a, 2017b, 2018; Kokh, Novikov, 2014; Novikov, Sukhorukova, 2015].

В водоносном комплексе четвертичных отложений выделяют водоносные горизонты краснодубровской свиты (нижне- и среднечетвертичный), аллювиальных отложений третьей и первой надпойменных террас р. Оби (верхнечетвертичный) и аллювиальных отложений пойменной террасы р. Оби (современный). Горизонты четвертичных отложений, которые, как правило, обводнены не на всю мощность, так как подземные воды сдrenированы р. Обью, в основном опробованы в комплексе с трещинными водами палеозоя. *Горизонт краснодубровской свиты* представлен лессовыми суглинками и супесями с подчиненными слоями песков мощностью 20–40 м. По химическому составу воды гидрокарбонатные кальциево-магниевого с величиной общей минерализации до 250 мг/дм<sup>3</sup>. *Аллювиальные отложения третьей надпойменной террасы* р. Оби широко развиты в районе исследований и представлены в основании песками, гравием и галькой, в верхней части – тонкозернистыми песками, супесями и суглинками мощностью до 50 м. По химическому составу воды горизонта гидрокарбонатные кальциево-магниевого или кальциево-натриевого с величиной общей минерализации 340–570 мг/дм<sup>3</sup> с содержанием урана, не превышающим фоновых значений. Подземные воды слабонапорные, питание водоносного горизонта инфильтрационное и за счет подтока воды из отложений краснодубровской свиты. *Аллювиальные отложения первой надпойменной террасы* р. Оби простираются узкой полосой до 0.7 км вдоль русла р. Оби. Вскрыты мелкозернистые пески, мощностью до 22 м. По химическому составу воды горизонта гидрокарбонатные кальциево-магниевого с величиной общей минерализации 500–800 мг/дм<sup>3</sup>. Местами отмечаются повышенные содержания урана в воде до  $3.2 \cdot 10^{-5}$  мг/дм<sup>3</sup>. *Аллювиальные отложения пойменной террасы* р. Оби распространены в виде узкой полосы вдоль правого берега реки и на островах, представлены суглинками, супесями, песками тонко-мелкозернистыми, глинистыми, мощностью от 10 до 28 м. По химическому составу воды горизонта гидрокарбонатные кальциево-магниевого с величиной общей минерализации 500–800 мг/дм<sup>3</sup>. Характерно повышенное содержание железа, содержание урана в воде не превышает фоновое. Питание атмосферное, воды безнапорные.

В водоносном комплексе палеозойского фундамента подземные воды установлены в верхней

трещиноватой зоне палеозойских глинистых сланцев и песчаников и в зонах деструкции изверженных пород.

*Водоносный горизонт палеозойских отложений* распространен в верхнедевонских – нижнекаменноугольных глинистых сланцах с прослоями песчаников (нередко слюдяных с вкраплениями пирита), разбитых системой трещин. Вблизи контакта гранитного массива и даек интрузий со вмещающими породами эти отложения претерпели термодинамометаморфизм и были превращены в роговики с признаками альбитизации. Отложения палеозойского фундамента вскрываются на глубинах 15–17 м, верхняя часть разреза представлена корой выветривания материнских пород мощностью от 5 до 40 м – глинистым элювием. Глины пестроцветные, каолинизированные, часто с обломками материнских пород. Глины коры выветривания служат водоупором, поэтому воды в трещиноватых породах палеозоя относятся к слабонапорным. К осадочно-терригенным отложениям палеозоя приурочены трещинные воды, обводненность пород неравномерная, дебиты скважин изменяются от 0.3 до 1.3 л/с. По химическому составу воды гидрокарбонатные кальциево-натриевого, пресные с минерализацией 0.3–0.6 г/дм<sup>3</sup>. Реакция pH изменяется от 7.0 до 7.8, т.е. воды слабощелочные. Содержание урана в воде не превышает обычных фоновых содержаний в районе (до  $3 \cdot 10^{-6}$  г/дм<sup>3</sup>), фоновое содержание радия в воде составляет  $1.3 \cdot 10^{-12}$  –  $1.8 \cdot 10^{-12}$  г/дм<sup>3</sup>. Концентрация радона в воде определялась во время откачек в скважинах и составляла 37–259 Бк/дм<sup>3</sup>. Питание подземных вод палеозоя инфильтрационное, область разгрузки – р. Обь.

*Водоносный горизонт нестратифицируемых верхнепалеозойских интрузивных образований.* Новосибирский гранитоидный массив входит в Заельцовско-Мочищенскую зону своей северо-западной приконтактной частью (см. рис. 2). Граниты перекрыты осадками надпойменных террас р. Оби и краснодубровской свиты (см. рис. 3). Граниты вскрыты на глубинах от 28 до 46 м. В районе пос. Карьер Мочище вскрыты граниты розовато-серого цвета, средне- и крупнозернистые, слабопорфировидные, с сульфидной минерализацией, состоящие из полевых шпатов и кварца. Также вскрыт непосредственно контакт гранитов с роговиками, т.е. отмечается чередование роговиков и гранитов в вертикальном разрезе (рис. 4). Приконтактные граниты разнозернистые, светло-серые, порфировидные, гидротермально измененные, хлоритизированные, альбитизированные, трещинные. Роговики зеленовато-серого цвета, иногда почти черного, яшмовидные, массивные, трещиноватые. Граниты и роговики часто пиритизированы. К трещинным зонам гранитов приурочены слабонапорные подзем-

ные воды. Местами пески четвертичного возраста залегают непосредственно на гранитах, эти подземные воды гидравлически связаны. Питание подземных вод осуществляется в основном за счет инфильтрации атмосферных осадков. Воды гидрокарбонатные кальциево-натриевые, с величиной общей минерализации 270–560 мг/дм<sup>3</sup>. По реакции рН воды изменяются от слабокислых до слабощелочных. Все скважины, вскрывшие граниты и приконтактовые роговики, были опробованы на содержание радона в воде, его концентрация находится в пределах 308–801 Бк/дм<sup>3</sup>, т.е. по содержанию радона воды относятся к слаборадоновым и умеренно радоновым, минеральным (по классификации Н.И. Толстихина). В скважинах, вскрывших роговики, концентрация радона в воде составляет 37–241 Бк/дм<sup>3</sup>. Концентрация радия в воде не превышает фоновых значений и составляет  $1.3 \cdot 10^{-12}$  –  $1.9 \cdot 10^{-12}$  г/дм<sup>3</sup>.

### 2.3. Гидрогеохимия радоновых вод

Следует отметить низкую степень гидрогеологической изученности новосибирских радоновых вод и отсутствие обобщений имеющихся гидрогеохимических данных. Радоновые воды Заельцовско-Мочищенской зоны являются нейтральными и слабощелочными (рН от 6.9 до 7.8), пресными, с величиной общей минерализации, варьирующейся от 322 до 895 мг/дм<sup>3</sup>. По содержанию радона (по классификации Н.И. Толстихина) воды относятся к классам от очень слаборадоновых до умеренно радоновых с содержанием <sup>222</sup>Rn от 11 до 801 Бк/дм<sup>3</sup>. Формулы химического состава гидрокарбонатных кальциевых, кальциево-натриевых, кальциево-магниевых и магниевых вод имеют следующий вид (в формуле М.Г. Курлова концентрация <sup>222</sup>Rn приведена в нКи/дм<sup>3</sup>):

$$Rn11.8M0.65 \frac{HCO_3^- 90Cl^- 5SO_4^{2-} 5}{Ca^{2+} 68(Na^+ + K^+) 19Mg^{2+} 13} pH6.9T(6.7 - 7.3)$$

(скв. 36),

$$Rn18.5M0.79 \frac{HCO_3^- 78SO_4^{2-} 18Cl^- 4}{Ca^{2+} 55(Na^+ + K^+) 33Mg^{2+} 12} pH7.2T(6.9 - 7.5)$$

(скв. 29),

$$Rn16.5M0.32 \frac{HCO_3^- 89Cl^- 9SO_4^{2-} 2}{Ca^{2+} 41Mg^{2+} 30(Na^+ + K^+) 29} pH7.6T(7.2 - 8.3)$$

(скв. 20),

$$Rn7.1M0.80 \frac{HCO_3^- 77SO_4^{2-} 18Cl^- 5}{Mg^{2+} 62Ca^{2+} 33(Na^+ + K^+) 5} pH7.2T(6.9 - 7.0)$$

(скв. 62).

Радоновые воды незначительно отличаются по своему химическому составу и содержанию основных макро- и микрокомпонентов. На диаграмме Пайпера (рис. 5) показаны соотношения макроком-

понентов в радоновых водах. По химическому типу (по классификации С.А. Щукарева) доминируют преимущественно гидрокарбонатные кальциевые и гидрокарбонатные кальциево-натриевые воды. Химические анализы типовых проб радоновых вод, приуроченных к водоносным зонам верхнедевонско-нижнекаменноугольных роговиков и верхнепалеозойских гранитов, приведены в таблице 1. В изученных водах наиболее тесная связь с общей минерализацией отмечается у суммы натрия и калия, кальция, гидрокарбонат-иона, сульфат-иона и хлорид-иона, концентрации которых варьируются в интервалах 7–107, 28–160, 207–488, 3–126 и 4–100 мг/дм<sup>3</sup>. Выявлено, что содержания гидрокарбонат-иона начинают снижаться при величине общей минерализации радоновых вод около 750–800 мг/дм<sup>3</sup>. Это сопровождается закономерным ростом в анионном составе концентраций сульфат- и хлорид-ионов и сменой химического типа вод. Установленные особенности накопления основных солеобразующих компонентов четче проявляются в разных химических типах радоновых вод. Так, например, в гидрокарбонатных кальциевых водах содержание натрия составляет 7–56, кальция – 79–159 мг/дм<sup>3</sup>, тогда как в кальциево-натриевых изменяется в диапазоне 27–107 и 43–111 мг/дм<sup>3</sup> соответственно.

Радоновые воды имеют интересный спектр распределения микроэлементов (рис. 6). Видно, что в микрокомпонентном составе радоновых вод повышены содержания стронция (до 4.7 мг/дм<sup>3</sup>), марганца (до 1.3 мг/дм<sup>3</sup>) и бария (до 0.2 мг/дм<sup>3</sup>). На месторождении концентрации кремнезема в воде варьируются в интервале от 7 до 36 мг/дм<sup>3</sup>. С ростом общей минерализации в растворе помимо кремнезема, стронция, марганца и бария также накапливаются в следующих концентрациях (мкг/дм<sup>3</sup>): медь (до 13.0), серебро (до 14.0), молибден (до 31.0), никель (до 9.7), циркон (до 52.0), титан (до 197), свинец (до 78), цинк (до 235), кобальт (до 1.0), литий (до 40) и т.д. Повышенным содержанием урана (до 98 мкг/дм<sup>3</sup>) отличаются воды зоны верхнедевонско-нижнекаменноугольных роговиков, тогда как в водоносной зоне верхнепалеозойских гранитов оно составляет 0.32–2.60 мкг/дм<sup>3</sup>. Схожие концентрации урана характеризуют также воды родника Шивелиг-1 на Шивелигском месторождении радоновых вод в Республике Туве [Bulatov et al., 2013].

Был выполнен сравнительный анализ особенностей геохимии радоновых вод Заельцовско-Мочищенской зоны и ряда месторождений Алтая, Тувы, Италии и Туниса (рис. 7) [Baryshnikov, Eliseev, 2009; Bulatov et al., 2013; Mineeva et al., 2016; Allocca et al., 2018; Telahigue et al., 2018]. Установлено, что каждое месторождение имеет свой уникальный спектр распределения основных макро- и микро-

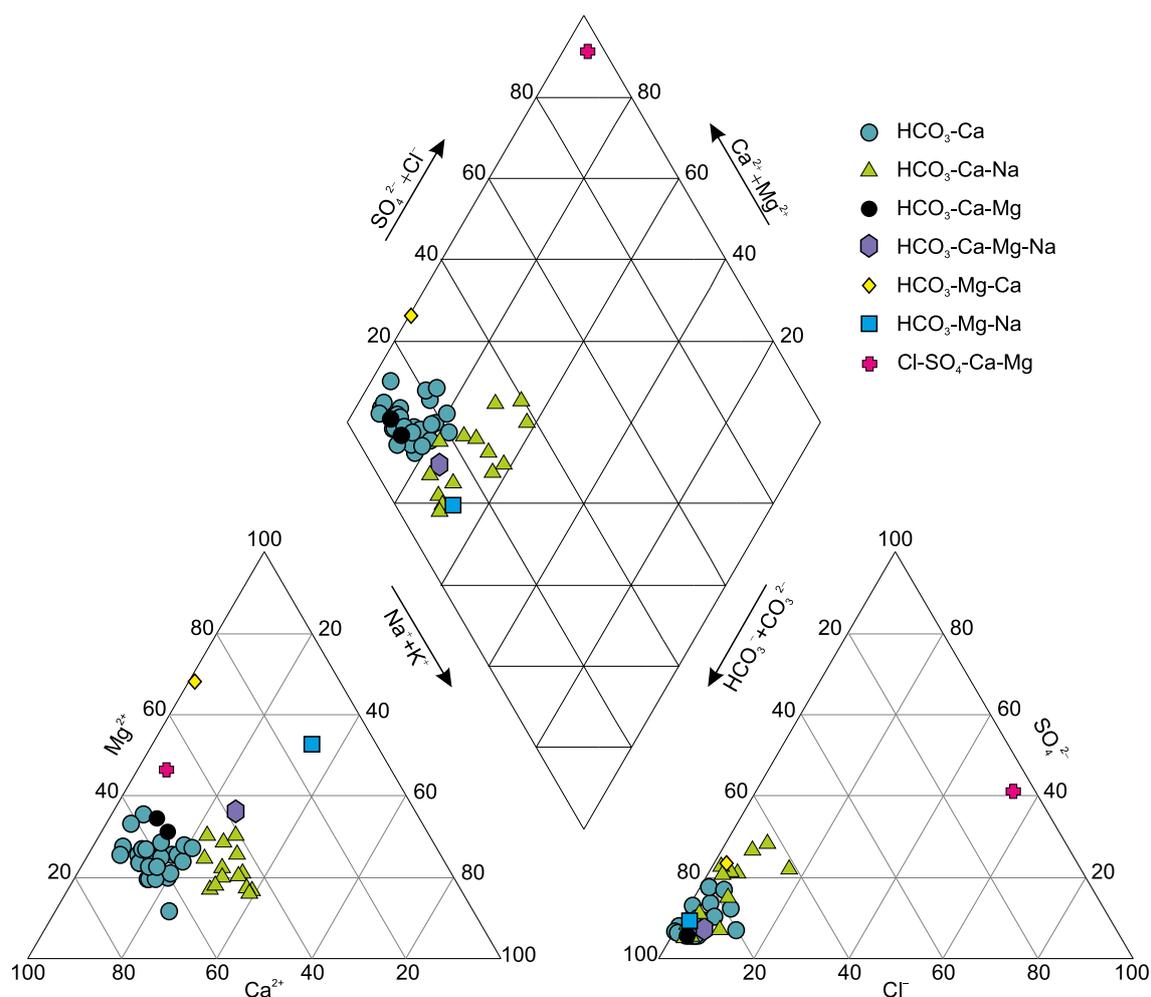


Рис. 5. Диаграмма Пайпера состава радоновых вод Заельцовско-Мочищенской зоны.

Fig. 5. Piper diagram showing the chemical composition of the radon waters from the Zaeltsovsko-Mochishchensky zone.

компонентов. Помимо химического состава радоновые воды значительно отличаются по величине общей минерализации от ультрапресных и пресных в пределах Заельцовско-Мочищенской зоны в Новосибирске, Белокурихинского, Каменского, Рахмановского месторождений на Алтае и Шивелигского в Туве до соленых вод с величиной общей минерализации до 19.9 г/дм<sup>3</sup> на о-ве Джерба в Тунисе [Telahigue et al., 2018]. Установлено, что концентрации радона не зависят от химического состава вод. В значительно большей степени они контролируются температурой воды, что связано с уменьшением растворимости газа с ее повышением. Поскольку период полураспада <sup>222</sup>Rn в ряду урана-радия составляет 3.823 сут, его миграция на расстояние более первых десятков метров от источника эманации практически невозможна, что также сказывается на концентрации радона в воде, поэтому <sup>222</sup>Rn содержится в значимых количествах как в ультрапресных и пресных водах, так и в солоноватых и соленых. Таким образом, концентрация

радона в водах не определяется их геохимическим типом и связана, прежде всего, с минералогическим составом (в акцессорной и рудной части) водовмещающих пород, степенью дезинтеграции пород и наличием изотопных продуктов распада ряда урана-радия (эманирующего коллектора).

#### 2.4. ФОРМЫ МИГРАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В настоящей работе с использованием программных комплексов Visual Minteq, PhreeqC, WATEQ4f и HG-32 впервые рассмотрены механизмы, масштабы накопления и формы миграции микроэлементов в радоновых водах, а также степень насыщения вод Заельцовско-Мочищенской зоны относительно порообразующих минералов. Для расчетов были использованы выборочные данные химического анализа по 48 пробам радоновых вод.

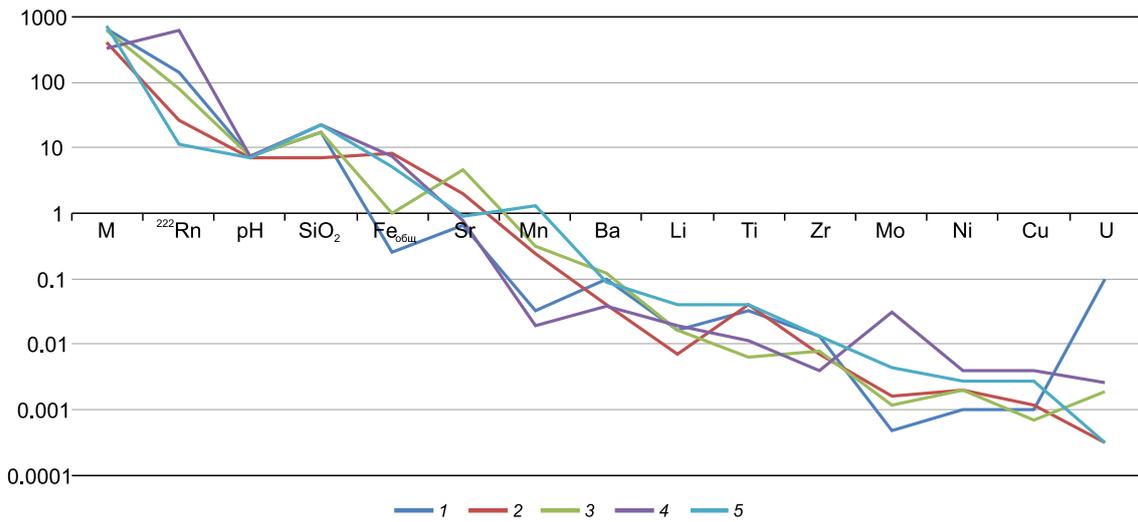
Результаты исследований показали, что основными формами миграции макроанионов в исследуемых водах являются:

Т а б л и ц а 1. Химические анализы типовых проб радоновых вод Заельцовско-Мочищенской зоны (мг/дм<sup>3</sup>)  
 T a b l e 1. Chemical analyzes of standard radon-water samples from the Zael'tsovsko-Mochishchensky zone (mg/dm<sup>3</sup>)

№ скв.	рН	М*	Химический тип воды**	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	St <sup>2+</sup>	Ba <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Fe <sub>общ.</sub>	SiO <sub>2</sub>	<sup>222</sup> Rn***	<sup>226</sup> Ra
Водоносная зона верхнедевонско-нижнекаменноугольных роговиков															
31	7.6	374	HCO <sub>3</sub> -Ca-Na	14	46	0.98	н.д.	27	20	4	244	5.50	12	33.38	1.3·10 <sup>-9</sup>
37	7.2	687	HCO <sub>3</sub> -Ca	6	113	0.98	0.200	52	14	48	427	6.75	18	185.44	н.д.
42	7.5	667	HCO <sub>3</sub> -Ca	22	115	0.65	0.098	18	19	0	475	0.25	17	144.64	н.д.
56	7.8	664	HCO <sub>3</sub> -Ca	14	104	0.41	н.д.	43	20	31	427	3.50	21	140.93	н.д.
60	7.5	668	HCO <sub>3</sub> -Ca	20	99	0.08	0.014	39	11	28	451	3.00	17	51.92	н.д.
61	7.5	584	HCO <sub>3</sub> -Ca	19	96	0.48	0.129	23	19	0	414	0.63	12	252.2	н.д.
62	7.2	795	HCO <sub>3</sub> -Mg-Ca	109	96	1.97	0.197	14	19	82	451	7.00	14	263.32	1.3·10 <sup>-9</sup>
Водоносная зона верхнепалеозойских гранитов															
25	6.9	417	HCO <sub>3</sub> -Ca-Na	15	43	2.00	0.040	36	12	0.5	287	8.40	7	25.96	н.д.
26	7.6	626	HCO <sub>3</sub> -Ca	28	94	4.70	0.120	17	12	3	445	0.98	17	77.88	н.д.
27	7.8	616	HCO <sub>3</sub> -Ca-Na	18	80	1.56	н.д.	48	12	12	426	1.00	17	203.98	1.3·10 <sup>-9</sup>
28	6.9	676	HCO <sub>3</sub> -Ca	14	113	0.55	0.068	36	14	47	427	3.50	20	278.16	н.д.
29	7.2	788	HCO <sub>3</sub> -Ca-Na	14	108	1.45	0.097	73	15	82	464	1.13	23	686.13	1.9·10 <sup>-9</sup>
30	7.6	322	HCO <sub>3</sub> -Ca-Mg-Na	14	31	0.77	0.039	25	12	3	207	7.25	22	611.95	1.3·10 <sup>-9</sup>
32	7.2	895	HCO <sub>3</sub> -Ca-Na	15	108	3.11	н.д.	108	46	126	451	2.00	36	519.23	1.9·10 <sup>-9</sup>
33	7.4	603	HCO <sub>3</sub> -Ca	18	100	0.50	н.д.	23	20	6	414	1.13	20	241.07	1.3·10 <sup>-9</sup>
34	7.2	741	HCO <sub>3</sub> -Ca-Na	14	97	0.89	0.089	69	18	25	488	5.00	23	11.13	н.д.
35	7.2	717	HCO <sub>3</sub> -Ca-Na	13	84	0.40	0.090	82	18	66	427	14.0	12	133.52	н.д.
36	6.9	647	HCO <sub>3</sub> -Ca	13	105	0.69	0.120	33	14	17	427	14.0	23	437.64	н.д.
41	6.9	532	HCO <sub>3</sub> -Ca	14	88	0.84	0.168	22	19	0	366	3.00	18	311.54	1.3·10 <sup>-9</sup>

П р и м е ч а н и е. \* – величина общей минерализации радоновых вод, мг/дм<sup>3</sup>; \*\* – химический тип воды приведен по классификации С.А. Шукарева; \*\*\* – концентрация радона, Бк/дм<sup>3</sup>; н.д. – нет данных.

N o t e. \* – total mineralization of radon waters, mg / dm<sup>3</sup>; \*\* – chemical type of water, according to the classification proposed by S.A. Schukarev; \*\*\* – radon concentration, Bq/dm<sup>3</sup>; н.д. – no data.

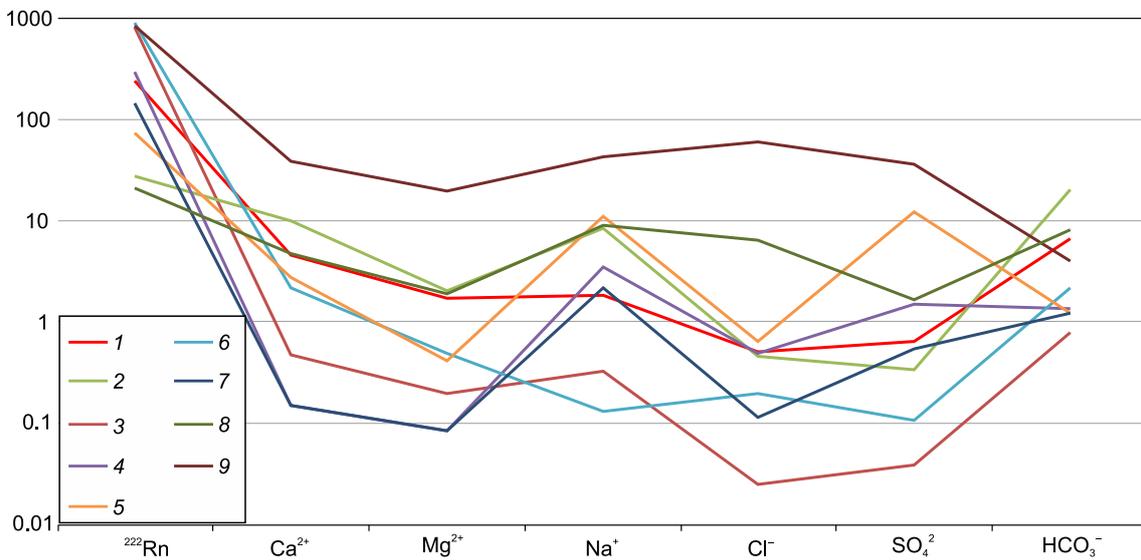


**Рис. 6.** Спектр распределения микроэлементов в радоновых водах Заельцовско-Мочищенской зоны. Объекты, изученные в водоносной зоне верхнедевонско-нижнекаменноугольных роговиков: 1 – скв. 42 и верхнепалеозойских гранитов: 2 – скв. 25, 3 – скв. 26, 4 – скв. 30, 5 – скв. 34.

**Fig. 6.** Distribution spectrum of microelements in the radon waters of the Zaeltsovsko-Mochishchensky zone. Objects studied in the aquifer zone of the Upper Devonian – Carboniferous hornfels: 1 – well 42, and Upper Paleozoic granites: 2 – well 25, 3 – well 26, 4 – well 30, 5 – well 34.

дуремых водах являются свободные ионы (>90 %) и гидрокарбонатные комплексы (<10 %). Щелочные ( $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Li^+$ ) и щелочно-земельные металлы ( $Mg^{2+}$ ,

$Ca^{2+}$ ,  $Sr^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$ ) находятся в изученных водопроявлениях в виде одновалентных ( $Me^+$ ) и двухвалентных ( $Me^{2+}$ ) катионов соответственно.



**Рис. 7.** Диаграмма Шоллера среднего состава радоновых вод (мг-экв/дм<sup>3</sup>) и содержаний в них радона (Бк/дм<sup>3</sup>). Месторождения и проявления радоновых вод: 1 – Заельцовско-Мочищенское, 2 – Чойган, 3 – Шивелигское, 4 – Белокурихинское, 5 – Нилова Пустынь, 6 – Каменское, 7 – Рахмановское, 8 – Кума (Флегрейские поля, Италия), 9 – Джерба (Тунис).

**Fig. 7.** Scholler diagram showing the average compositions of radon waters (eq. mg/dm<sup>3</sup>) and radon concentrations (Bq/dm<sup>3</sup>). Deposits and zones of radon waters: 1 – Zaeltsovsko-Mochishchensky, 2 – Choigan, 3 – Shivelig, 4 – Belokurikha, 5 – Nilova Pustin, 6 – Kamenskoe, 7 – Rakhmanovskoe, 8 – Kuma (Flegrei fields, Italy), 9 – Djerba (Tunisia).

Что касается такого элемента гидролизата, как железо, то его высокий кларк обуславливает присутствие этого металла как неперменного компонента в природных водах. В зависимости от окислительно-восстановительного потенциала природных вод железо проявляет характерные для него степени окисления +2 и +3. Большую роль играют щелочно-кислотные условия. Основной миграционной формой железа (II) является его ионная форма  $Fe^{2+}$ , второстепенными формами являются  $FeCO_3$ ,  $(FeHCO_3)^+$ . Насыщение воды кислородом приводит к быстрому окислению  $Fe^{2+}$  до  $Fe^{3+}$ , поэтому в водных растворах чаще всего встречаются соединения железа (III), как термодинамически более устойчивые.  $Fe^{3+}$  характеризуется способностью к образованию устойчивых комплексных соединений с некоторыми неорганическими анионами, особенно с  $OH^-$ . Так, при изучении основных форм миграции  $Fe^{3+}$  были идентифицированы следующие гидроокисные формы:  $Fe(OH)_2^+$ ,  $(FeOH)_2^+$ ,  $Fe(OH)_3$ ,  $(Fe(OH)_4)^-$ ,  $(Fe(OH)_2)_2^+$ , соотношение между которыми зависит от pH и Eh вод, а также от общей концентрации железа. При этом  $Fe^{2+}$  мигрирует в ионной форме при подчиненном значении (1–7 %) сульфатных комплексов  $FeSO_4(aq)$ . Аналогично ведет себя марганец, мигрируя в ионной форме  $Mn^{2+}$  (65–90 %), а также в виде карбонатных и сульфатных комплексов  $MnCO_3(aq)$  (до 4–23 %) и  $MnSO_4(aq)$  (1–5 %) (табл. 2).

Рассмотрим формы миграции отдельных микроэлементов. Так, молибден мигрирует преимущественно в форме отрицательно заряженного оксидного комплекса  $MoO_4^{2-}$  (59–67 %), в меньших долях в виде комплексов  $MgMoO_4(aq)$  (14–22 %) и  $CaMoO_4(aq)$  (12–20 %). Барий относится к элементам малого диапазона водной миграции и мигрирует в основном в виде иона  $Ba^{2+}$  (>90 %), комплексного гидрокарбонат-иона  $BaHCO_3^+$  и сульфат-иона  $BaSO_4(aq)$ . В комплексе с гидроксид-ионом осуществляется перенос значительной доли бериллия (элемента 1-го класса опасности)  $Be(OH)_2(aq)$ , выявленного в водовмещающих породах зон верхнедевонско-нижнекаменноугольных роговиков ( $D_3-C_1$ ) и верхнепалеозойских гранитов ( $\gamma Pz_3$ ) [Korneeva, Novikov, 2018]. Формы серебра представлены в виде свободных ионов  $Ag^+$  (39–65 %), нейтральных аквакомплексов  $AgCl(aq)$  (0–55 %) и отрицательно заряженного комплекса  $AgCl_2^-$  (0.8–4.2 %). Большая часть свинца мигрирует в виде карбонатных нейтральных комплексов  $PbCO_3(aq)$  (79.8 %). Формы цинка представлены в основном свободными ионами  $Zn^{2+}$ , в меньшей доле карбонатными  $ZnCO_3(aq)$  и гидрокарбонатными комплексами  $ZnHCO_3$  (табл. 2) Формы урана представлены преимущественно уранил-карбонатными комплексами кальция  $Ca_2UO_2(CO_3)_3(aq)$  (61–75 %) и  $CaUO_2(CO_3)_3^{2-}$  (25–36 %).

Изученные радоновые воды равновесны или близкоравновесны с карбонатными (кальцит, доломит, сидерит, родохрозит, магнезит) и силикатными минералами (гриналит, сепиолит), минеральными фазами, содержащими тяжелые металлы в кристаллической решетке (манганит, барит, родохрозит, рутил, тенорит), и гидрооксидами Fe (ферригидрит, гётит и другие аморфные соединения), т.е. эти минералы осаждаются из вод (являются вторичными) и не могут быть источником железа в водах (рис. 8). В этих условиях активно растворяются силикатные минералы, хризотил, сепиолит, магнезит, стронцианит, которые неустойчивы при существующих в данной системе физико-химических условиях и становятся источником не только магния, но и меди, стронция, кремния и других элементов.

Установлены особенности насыщения радоновых вод минералами в зависимости от их химического состава. Так,  $HCO_3-Ca$  воды насыщены относительно кальцита, ферригидрита, кварца, гриналита, манганита, рутила, сидерита. Наблюдается равновесие с арагонитом, халцедоном, кристобалитом, доломитом, родохрозитом и фатеритом. Воды не насыщены диоксидом циркония, гидроксидом цинка, витеритом, теноритом, сепиолитом, повеллитом и его модификациями, молибдатом кальция, пирохроитом, несквегонитом, натриевым ярозитом, магнезитом, молибдатом железа (II) и гидроксидом железа (II), эпсомитом, целестином, бруситом, гипсом и ангидритом. Воды  $HCO_3-Ca-Na$  состава равновесны с арагонитом, баритом, кальцитом, керагиритом, церруситом и гидроцерруситом, халцедоном, кристобалитом, доломитом, сидеритом, фатеритом, карбонатом цинка и при изменении геохимических параметров среды (pH, Eh) вероятно их осаждение. Воды насыщены ферригидритом, гриналитом, манганитом, гаусманнитом, модификациями диоксида кремния, гидроксипатитом, родохрозитом и рутилом. Особенности микроэлементного состава отдельных проб радоновых вод приводят к образованию и возможному осаждению взвеси, содержащей такие минеральные фазы, как вивианит и гидрофосфат марганца. При этом радоновые воды резко не насыщены по отношению к гидроцинкиту. Так как в модельных расчетах не учитывалась концентрация радона в воде, прямых зависимостей форм миграции элементов от его содержания не обнаружено.

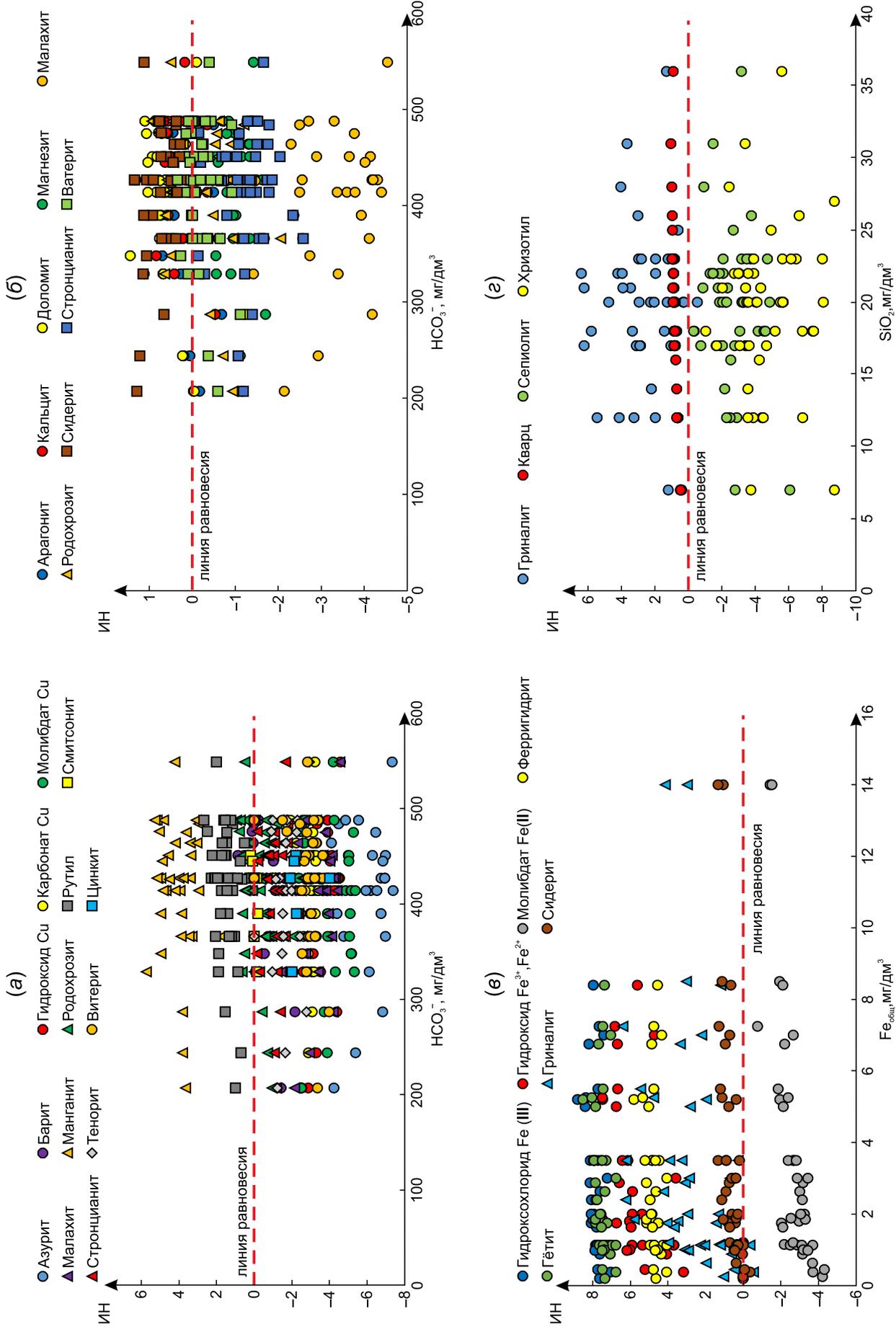
### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы. В гидрогеологическом отношении радоновые воды связаны с водоносными зонами верхнедевонско-нижнекаменноугольных глинистых сланцев

Т а б л и ц а 2. Преобладающие формы миграции некоторых микроэлементов в радоновых водах по результатам физико-химического моделирования, % от первоначальной концентрации иона (минимальное – максимальное значение)

Table 2. Physicochemical simulation results: dominating forms of migration of some trace elements in the radon waters, % of the initial ion concentration (minimum – maximum value)

Ион	Формы миграции	Водоносный горизонт, водоносная зона									
		$a Q_{IV}$	$a Q_{IV+D3-C1}$	$a_3 Q_{III}$	$a_3 Q_{III+D3-C1}$	$D_{3-C1}$	$D_{3-C1} + \gamma Pz_3$	$\gamma Pz_3$	$Q_{I-ukrd+D3-C1}$		
Ag <sup>+</sup>	Ag <sup>+</sup>	46.6	39.64	50.74	59.5	52.3-65.8	57.9	51.4-61.7	-	-	
	AgCl (aq)	50.3	55.33	49.9	39.0	0-45.5	0.013	37.0-46.1	-	-	
	AgCl <sub>2</sub> <sup>-</sup>	2.84	4.2	2.3	1.34	0.8-2.1	1.4	1.10-2.09	-	-	
	AgNH <sub>3</sub> <sup>+</sup>	-	0.167	-	-	-	0.028	0.02-0.10	-	-	
	AgNO <sub>2</sub> (aq)	-	0.34	-	-	1.0	-	0-0.045	-	-	
Be <sup>2+</sup>	AgSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0.17	0.31	0.033	0.085	0.03	0.27	0.02-0.30	-	-	
	Be <sup>2+</sup>	-	-	-	-	-	0.33	0.084	-	-	
	Be(OH) <sub>2</sub> (aq)	-	-	-	-	-	98.8	99.5	-	-	
	BeCO <sub>3</sub> (aq)	-	-	-	-	-	0.78	0.395	-	-	
	Zn <sup>2+</sup>	-	-	-	67	52.5	82.0	64.0	-	-	
Zn <sup>2+</sup>	Zn(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> <sup>2-</sup>	-	-	-	0.089	0.33	-	0.143	-	-	
	Zn(OH) <sub>2</sub> (aq)	-	-	-	0.55	1.73	0.04	0.84	-	-	
	ZnCl <sup>+</sup>	-	-	-	0.08	0.055	0.058	0.039	-	-	
	ZnCO <sub>3</sub> (aq)	-	-	-	20.19	34.6	6.27	0.012	-	-	
	ZnHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	-	-	-	8.38	7.18	10.32	8.3	-	-	
Ni <sup>2+</sup>	ZnOH <sup>+</sup>	-	-	-	1.531	2.41	0.324	1.26	-	-	
	ZnSO <sub>4</sub> (aq)	-	-	-	2.1	1.215	0.99	0.137	-	-	
	Ni <sup>2+</sup>	52.452	-	57.3-62.9	51.7-61.4	53.9-62.6	58.5-64.4	55.60-65.16	60.4	-	
	NiCO <sub>3</sub> (aq)	11.41	-	6.2-6.6	4.3-23.3	0.015-14.000	3.1-9.9	3.2-14.4	9.55	-	
	NiHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	35.262	-	30.6-33.0	23.5-34.0	0.037-32.300	31.1-31.6	28.6-39.3	29.9	-	
Pb <sup>2+</sup>	NiOH <sup>+</sup>	0.127	-	0.082-0.094	0.057-0.382	0.064-0.216	0.03-0.13	0.05-1.14	0.01	-	
	NiSO <sub>4</sub> (aq)	0.671	-	0.094-2.990	0.13-1.67	0.034-7.000	0.24-1.90	0-0.1	-	-	
	Pb(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> <sup>2-</sup>	-	-	-	-	-	-	3.34	-	-	
	Pb(OH) <sub>2</sub> (aq)	-	-	-	-	-	-	0.028	-	-	
	Pb <sup>2+</sup>	-	-	-	-	-	-	3.43	-	-	
Mn <sup>2+</sup>	PbCl <sup>+</sup>	-	-	-	-	-	-	0.026	-	-	
	PbCO <sub>3</sub> (aq)	-	-	-	-	-	-	79.8	-	-	
	PbHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	-	-	-	-	-	-	11.2	-	-	
	PbOH <sup>+</sup>	-	-	-	-	-	-	2.1	-	-	
	PbSO <sub>4</sub> (aq)	-	-	-	-	-	-	0.017	-	-	
Mn <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	70.5-77.0	68.7-73.4	62.39-97.80	59.3-84.2	58.8-81.6	68.7-86.0	69.6-87.3	-	-	
	MnCO <sub>3</sub> (aq)	15.7-20.7	0.05-19.80	0.04-10.90	0.018-8.000	0.018-23.100	0.021-17.300	0.015-5.700	-	-	
	MnHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	5.9-7.6	0.015-5.900	0.04-6.40	4.30-7.55	0.011-6.760	5.90-7.35	0.014-6.800	-	-	
	MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0.10-0.18	0.20-0.27	0.025-0.800	0.074-0.530	0.06-1.00	0.04-0.30	0.014-0.160	-	-	
	MnOH <sup>+</sup>	0.030-0.036	0.04-0.43	0.022-0.130	0.016-0.087	0.016-0.070	0.03-0.05	0.015-0.060	-	-	
MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	MnSO <sub>4</sub> (aq)	0.80-1.15	0.079-0.400	0.03-3.60	0.013-0.045	0.01-0.56	0.016-2.250	0-1.1	-	-	
	MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	60.8-70.2	59.6-64.0	56.7-62.1	58.3-61.9	38.2-66.4	58.6-64.5	55.3-68.1	58.3	-	
	MgMoO <sub>4</sub>	21.0-26.5	14.9-20.5	15.6-30.3	14.4-23.0	6.8-52.3	14.2-20.2	0.012-26.300	23.5	-	
	CaMoO <sub>4</sub>	3.1-18.1	17.6-22.4	12.9-22.2	16.9-23.5	9.3-26.5	21.0-23.6	10.0-22.2	18.1	-	



**Рис. 8.** Индексы насыщения радоновых вод относительно минеральных фаз гидрокарбонатов (а, б), железа (e) и кремния (z).

**Fig. 8.** Saturation indices of the radon waters relative to the mineral phases of hydrocarbons (a, б), iron (e) and silicon (z).

и роговиков, а также верхнепалеозойских гранитов. Водообильность отложений изменяется в широких пределах, дебиты скважин составляют от 25 до 110 м<sup>3</sup>/сут. Радоновые воды – трещинные, холодные с температурой 6–10 °С, залегают на глубинах 50–200 м. Воды по химическому составу (по классификации С.А. Щукарева) преимущественно гидрокарбонатно-кальциевого и гидрокарбонатного кальциево-натриевого состава с величиной общей минерализации 322–895 мг/дм<sup>3</sup>. Все скважины, вскрывшие граниты и приконтактовые роговики, были опробованы на содержание в воде <sup>222</sup>Rn, концентрации которого варьируются в широких пределах от 11 до 801 Бк/дм<sup>3</sup>, т.е. по содержанию <sup>222</sup>Rn воды относятся к слаборадоновым и умеренно радоновым, минеральным (по классификации Н.И. Толстихина). В скважинах, вскрывших роговики, концентрация радона в воде составляет 37–241 Бк/дм<sup>3</sup>. Содержания <sup>238</sup>U и <sup>226</sup>Ra не превышают 0.098 мг/дм<sup>3</sup> и 1.9·10<sup>-9</sup> мг/дм<sup>3</sup> соответственно. Поскольку период полураспада <sup>222</sup>Rn в ряду урана–радия составляет 3.823 сут, миграция его на расстояние более первых десятков метров от источника эманации практически невозможна, что также сказывается на концентрации радона в воде родников, поэтому <sup>222</sup>Rn содержится в значимых количествах как в ультрапресных, пресных водах, так и в солоноватых. Таким образом, концентрация радона в водах не определяется их геохимическим типом и связана, прежде всего, с минералогическим составом (в аксессуарной и рудной части) водовмещающих пород, степени дезинтеграции пород и наличием изотопных продуктов распада ряда урана–радия (эманлирующего коллектора). Установлено, что Ag<sup>+</sup>, Ba<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Sr<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup> мигрируют в основном в форме свободных

ионов, а Be<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Zr<sup>4+</sup>, Ti<sup>4+</sup> – в виде гидроксидных комплексов. Формы нахождения урана представлены преимущественно уранил-карбонатными комплексами кальция Ca<sub>2</sub>UO<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>(aq) (61–75 %) и CaUO<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub><sup>2-</sup> (25–36 %). Расчеты выявили повсеместное насыщение вод относительно карбонатных (модификации CaCO<sub>3</sub> и CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, MnCO<sub>3</sub>, FeCO<sub>3</sub>, PbCO<sub>3</sub>), силикатных ((Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>)<sub>2</sub>–3Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>), гидроксидных (FeOОН, MnOОН) и оксидных минералов (модификации SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Mn<sup>2+</sup>Mn<sup>3+</sup>O<sub>4</sub>). В отдельных пробах наблюдается насыщение вод относительно редких фосфорсодержащих минералов (Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·8H<sub>2</sub>O, MnHPO<sub>4</sub>), керагирита (AgCl) и молибдата свинца (PbMoO<sub>4</sub>).

#### 4. БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования проводились при финансовой поддержке проекта IX.131.3.2 «Геохимия, генезис и механизмы формирования состава подземных вод арктических районов осадочных бассейнов Сибири» Программы IX.131.3 «Эволюция гидрогеологических систем осадочных бассейнов Сибири» Приоритетного направления IX.131 «Геология месторождений углеводородного сырья, фундаментальные проблемы геологии и геохимии нефти и газа, научные основы формирования сырьевой базы традиционных и нетрадиционных источников углеводородного сырья», Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук Российской Федерации на 2013–2020 гг., Российского фонда фундаментальных исследований и правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 17-45-540086-р а.

#### 5. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Allocca V., Coda S., De Vita P., Di Rienzo B., Ferrara L., Giarra A., Mangoni O., Stellato L., Trifuoggi M., Arienzo M., 2018. Hydrogeological and hydrogeochemical study of a volcanic-sedimentary coastal aquifer in the archaeological site of Cumae (Phlegraean Fields, southern Italy). *Journal of Geochemical Exploration* 185, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.jgexplo.2017.11.004>.
- Alonso H., Cruz-Fuentes T., Rubiano J.G., González-Guerra J., Cabrera M.C., Arnedo M. A., Tejera A., Rodríguez-Gonzalez A., Pérez-Torrado F.J., Martel P., 2015. Radon in Groundwater of the Northeastern Gran Canaria Aquifer. *Water* 7 (6), 2575–2590. <https://doi.org/10.3390/w7062575>.
- Babin G.A., Fedoseev G.S., Borisenko A.S., Zhigalov S.V., Vetrov E.V., 2014. New data on the granite complexes of the Novosibirsk Priobye (West Siberia). In: *Granites and the evolution of the Earth: granites and continental crust. Second International Geological Conference (17–20 August 2014, Novosibirsk)*. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, p. 28–30 (in Russian) [Бабин Г.А., Федосеев Г.С., Борисенко А.С., Жигалов С.В., Ветров Е.В. Новые данные по гранитным комплексам Новосибирского Приобья (Западная Сибирь) // Граниты и эволюция Земли: граниты и континентальная кора: Вторая международная геологическая конференция (17–20 августа 2014 г., г. Новосибирск). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. С. 28–30].
- Baryshnikov G.Ya., Eliseev V.A., 2009. Thermal therapeutic waters of the siliceous composition in the Altai-Sayan mountainous country. *Bulletin of Altai State University* (3), 41–47 (in Russian) [Барышников Г.Я., Елисеев В.А. Термальные лечебные воды кремнистого состава Алтае-Саянской горной страны // Известия Алтайского государственного университета. 2009. № 3. С. 41–47].
- Beitollahi M., Ghiassi-Nejad M., Esmaeli A., Dunker R., 2007. Radiological studies in the hot spring region of Mahallat, central Iran. *Radiation Protection Dosimetry* 123 (4), 505–508. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncl524>.

- Belshterli M.K., 1933. Granites of Novosibirsk. *Proceedings of the Petrographic Institute of the USSR Academy of Sciences* 3, 13–19 (in Russian) [Бельштейли М.К. Граниты Новосибирска // Труды Петрографического института АН СССР. 1933. Вып. 3. С. 13–19].
- Bertolo A., Bigliotto C., 2004. Radon concentration in waters of geothermal Euganean basin-Veneto, Italy. *Radiation Protection Dosimetry* 111 (4), 355–358. <https://doi.org/10.1093/rpd/nch053>.
- Böhm C., 2002. Radon in Wasser–Überblick für den Kanton Graubünden. *Jahresbericht Naturforschende Gesellschaft Graubünden* 111, 49–79. <https://doi.org/10.5169/seals-594820>.
- Bulatov A.A., Kopylova Yu.G., Dzhabarova N.K., Rychkova K.M., Arakchaa K.D., Khvashevskaya A.A., Guseva N.V., Pashagin A.V., 2013. New information on the composition of radon waters (Shivelig field). *Resort Base and Natural Health-Improving Areas of Tuva and Adjacent Regions* (1), 154–161 (in Russian) [Булатов А.А., Копылова Ю.Г., Джабарова Н.К., Рычкова К.М., Аракчаа К.Д., Хвасhevская А.А., Гусева Н.В., Пашагин А.В. Новые сведения о составе радоновых вод (Шивелигское месторождение) // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов. 2013. № 1. С. 154–161].
- Chaudhuri H., Nisith K.D., Bhandari R.K., Sen P., Sinh B., 2010. Radon activity measurements around Bakreswar thermal springs. *Radiation Measurements* 45 (1), 143–146. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.11.039>.
- Didenko P.I., 2011. Radon in groundwaters of Ukraine. *Technogenic-Ecological Safety and Civilian Defense* (3), 123–128 (in Russian) [Диденко П.И. Радон подземных вод Украины // Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист. 2011. № 3. С. 123–128].
- Distanov E.G., Borisenko A.S., Obolensky A.A., Sotnikov V.I., Lebedev V.I., 2006. Metallogeny of the polyaccretionary Altai-Sayan orogenic area. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 47 (12), 1257–1276.
- Dolgushin A.P., Tsaruk I.I., 2015. Uranium-ore potential of the Central Siberian region. *Razvedka i Okhrana Nedr (Exploration and Protection of Mineral Resources)* (10), 28–34 (in Russian) [Долгушин А.П., Царук И.И. Ураново-рудный потенциал Центрально-Сибирского региона // Разведка и охрана недр. 2015. № 10. С. 28–34].
- Duenas C., Fernandez M.C., Enríquez C., Carretero J., Liger E., 1998. Natural radioactivity levels in Andalusian spas. *Water Research* 32 (8), 2271–2278. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00472-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00472-7).
- Eliseev V.A., 2010. Radon nitrogen-thermal waters of Altai. *Problems of Balneology, Physiotherapy and Therapeutic Physical Culture* (5), 38–40 (in Russian) [Елисеев В.А. Радоновые азотно-термальные воды Алтая // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2010. № 5. С. 38–40].
- Erőss A., Mádl-Szőnyi J., Surbeck H., Horváth Á., Goldscheider N., Csoma A.É., 2012. Radionuclides as natural tracers for the characterization of fluids in regional discharge areas, Buda Thermal Karst, Hungary. *Journal of Hydrology* 426–427, 124–137. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.031>.
- Fedoseev G.S., Sotnikov V.I., Ponomarchuk V.A., 2001. Permo-Triassic granitoid and basaltoid magmatism of the Kolyvan-Tomsk folded zone (Western Altai-Sayan foldbelt). In: N.L. Dobretsov, B. Jahn, A.G. Vladimirov (Eds.), *Continental growth in the Phanerozoic: Evidence from Central Asia. Abstracts of the Third Workshop of IGCP-420. Geo, Novosibirsk*, p. 42–44.
- Gavrilkina S.V., 2016. Radon waters of the Ilmensky ridge. *Top Problems of Humanitarian and Natural Sciences* (8–1), 55–57 (in Russian) [Гаврилкина С.В. Радоновые воды Ильменского хребта // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 8–1. С. 55–57].
- Gurler O., Akar U., Kahraman A., Yalcin S., Kaynak G., Gundogdu O., 2010. Measurements of radon levels in thermal waters of Bursa, Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin* 19 (12a), 3013–3017.
- Gusev A.I., 1934. Geological Structure and Mineral Resources of the Novosibirsk Region. Publishing House of the West Siberian Geology-Hydro-Geodesy Trust, Tomsk, 101 p. (in Russian) [Гусев А.И. Геологическое строение и полезные ископаемые района г. Новосибирска. Томск: Изд. ЗСГГГТ, 1934. 101 с.].
- Gusev V.K., Verigo E.K., 1984. Radon waters of the Kolyvan-Tomsk folded zone, their use and protection. In: *Changes of natural conditions under the influence of human activities. Nauka, Novosibirsk*, p. 99–107 (in Russian) [Гусев В.К., Вериге Е.К. Радоновые воды Колывань-Томской складчатой зоны, их использование и охрана // Изменение природных условий под влиянием деятельности человека. Новосибирск: Наука, 1984. С. 99–107].
- Hoehn E., von Gunten H.R., 1989. Radon in groundwater: a tool to assess infiltration from surface waters to aquifers. *Water Resources Research* 25 (8), 1795–1803. <https://doi.org/10.1029/WR025i008p01795>.
- Kalinin Yu.A., Kanygin A.V., Korobeinikov V.P., Krasnov V.I., Martynov V.A., Nesterenko G.V., Osintsev S.R., Peregoedov L.G., Roslyakov N.A., Sviridov V.G., Serdyuk Z.Ya., Smirnov L.V., Surkov V.S., Khomichev V.L., 1999. Geological Structure and Mineral Resources of West Siberia. Vol. I. Geological Structure. Publishing House of SB RAS, SRC UIGGM, Novosibirsk, 228 p. (in Russian) [Калинин Ю.А., Каныгин А.В., Коробейников В.П., Краснов В.И., Мартынов В.А., Нестеренко Г.В., Осинцев С.П., Перегоедов Л.Г., Росляков Н.А., Свиридов В.Г., Сердюк З.Я., Смирнов Л.В., Сурков В.С., Хомичев В.Л. Геологическое строение и полезные ископаемые Западной Сибири. Т. I. Геологическое строение. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999. 228 с.].
- Kamenova-Totzeva R.M., Kotova R.M., Tenev J.G., Totzev A.V., Badulin V.M., 2015. Natural radioactivity content in Bulgarian drinking waters and consequent dose estimation. *Radiation Protection Dosimetry* 164 (3), 402–407. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu290>.
- Kies A., Hengesch O., Tosheva Z., Nawrot A.P., Jania J., 2015. Overview on radon measurements in Arctic glacier waters. *The Cryosphere Discussion* 9, 2013–2052. <https://doi.org/10.5194/tcd-9-2013-2015>.

- Kokh A.A., Novikov D.A., 2014. Hydrodynamic conditions and vertical hydrogeochemical zonation of groundwater in the Western Khatanga Artesian Basin. *Water Resources* 41 (4), 396–405. <https://doi.org/10.1134/S0097807814040083>.
- Korneeva T.V., Novikov D.A., 2018. Mechanisms of accumulation of trace elements in the radon waters of the Zaeltsovskiy field (southern West Siberia). In: Groundwaters of the eastern regions of Russia. Materials of the All-Russia conference on groundwaters of the eastern regions of Russia (XXII Meeting on groundwaters of Siberia and the Far East, with international participation) (18–22 June 2018, Novosibirsk). Publishing Center of Novosibirsk State University, Novosibirsk, p. 270–276 (in Russian) [Корнеева Т.В., Новиков Д.А. Механизмы накопления микроэлементов в радоновых водах Зельцовского месторождения (юг Западной Сибири) // Подземные воды Востока России: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам востока России (XXII Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием) (18–22 июня 2018 г., г. Новосибирск). Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018. С. 270–276].
- Kozlov A.M., 1971. Petrogeochemical Features of Late Hercynian granitoids of Novosibirsk Priobye and Massifs of the Kalbinsky complex of Gorny Altai. Author's Abstract of PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Tomsk, 19 p. (in Russian) [Козлов А.М. Петрогеохимические особенности позднегерцинских гранитоидов Новосибирского Приобья и некоторых массивов калбинского комплекса Горного Алтая: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Томск, 1971. 19 с.].
- Kuzmin A.M., Parshin P.N., 1976. On the geostructural position of the Ob granitoid massif. *Bulletin of Tomsk Polytechnic Institute* 289, 51–58 (in Russian) [Кузьмин А.М., Паршин П.Н. О геолого-структурном положении Обского гранитоидного массива // Известия ТПИ. 1976. Т. 289. С. 51–58].
- Matveev A.V., Starodubova A.P., Kudelsky A.V., Aizberg R.E., Naidenkov I.V., Karabanov A.K., Kapora M.S., 1996. Radon in natural and man-made complexes of Belarus. *Lithosphere* (Belarus) (5), 151–161 (in Russian) [Матвеев А.В., Стародубова А.П., Кудельский А.В., Айзберг Р.Е., Найденков И.В., Карabanov А.К., Капора М.С. Радон в природных и техногенных комплексах Беларуси // Литасфера. 1996. № 5. С. 151–161].
- Matveevskaya A.L., 1969. Hercynian Troughs of the Ob-Zaisan Geosynclinal System and Its Periphery. Nauka, Moscow, 286 p. (in Russian) [Матвеевская А.Л. Герцинские прогибы Обь-Зайсанской геосинклинальной системы и ее обрамления. М.: Наука, 1969. 286 с.].
- Mineeva L.A., Arakchaa K.D., Kyzyl O.M., 2016. Physicochemical characteristics of the Shumak and Choigan mineral water deposits. *Bulletin of Irkutsk State University. Earth Sciences Series* 17, 115–134 (in Russian) [Минеева Л.А., Аракчаа К.Д., Кызыл О.М. Физико-химическая характеристика минеральных вод месторождений Шумак и Чойган // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2016. Т. 17. С. 115–134].
- Moiseenko F.S., Puchkov E.P., Borozdin Yu.G., 1966. On the morphology of granite massifs of Novosibirsk Priobye according to geophysical data. *Geologiya i Geofizika (Soviet Geology and Geophysics)* 7 (5), 130–137 (in Russian) [Моисеенко Ф.С., Пучков Е.П., Бороздин Ю.Г. О морфологии гранитных массивов Новосибирского Приобья по геофизическим данным // Геология и геофизика. 1966. Т. 7. № 5. С. 130–137].
- Nebera T.S., 2010. Typomorphism of Rock-Forming Minerals as an Indicator of the Evolution of the Melt and the Physicochemical Conditions for Formation of Granitoids in the Kolyvan-Tomsk Folded Zone. Author's Abstract of PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Tomsk State University, Tomsk, 21 p. (in Russian) [Небера Т.С. Типоморфизм породообразующих минералов как показатель эволюции расплава и физико-химических условий образования гранитоидов Колывань-Томской складчатой зоны. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Томск: ТГУ, 2010. 21 с.].
- Novikov D.A., 2005. Geological and hydrogeological conditions of the Paleozoic basement of the Novoportovskiy oil-gas-condensate field. *Izvestia Vuzov (Bulletin of Universities). Oil and Gas* (5), 14–20 (in Russian) [Новиков Д.А. Геолого-гидрогеологические условия палеозойского фундамента Новопортковского нефтегазоконденсатного месторождения // Известия вузов. Нефть и газ. 2005. № 5. С. 14–20].
- Novikov D.A., 2017a. Hydrogeological conditions for the presence of oil and gas in the western segment of the Yenisei-Khatanga regional trough. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (4), 881–901 (in Russian) [Новиков Д.А. Гидрогеологические предпосылки нефтегазоносности западной части Енисей-Хатангского регионального прогиба // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 881–901]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0322>.
- Novikov D.A., 2017b. Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins. *Petroleum Exploration and Development* 44 (5), 780–788. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(17\)30088-5](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(17)30088-5).
- Novikov D.A., 2018. Oil and gas fields exploration in the Jurassic-Cretaceous deposits of Yamal Peninsula based on the water-gas equilibrium. *Neftyanoye Khozyaystvo (Oil Industry)* (4), 16–21 (in Russian) [Новиков Д.А. Разведка месторождений нефти и газа в юрско-меловых отложениях п-ова Ямал на основе изучения водно-газовых равновесий // Нефтяное хозяйство. 2018. № 4. С. 16–21]. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-4-16-21>.
- Novikov D.A., Sukhorukova A.F., 2015. Hydrogeology of the northwestern margin of the West Siberian Artesian Basin. *Arabian Journal of Geosciences* 8 (10), 8703–8719. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-1832-5>.
- Novariva Yu.A., 1968. On the facies of the depth and metallogenic features of the granitoid massifs of the Kolyvan-Tomsk folded zone. In: Proceedings of SNIIGGiMs. New data on magmatism and ore-bearing potential of the Altai-Sayan folded region. Series: Regularities of locations and occurrence of minerals. Issue 70. Novosibirsk, p. 155–159 (in Russian) [Нуварьева Ю.А. О фациях глубинности и металлогенических особенностях гранитоидных массивов Колывань-Томской складчатой зоны // Труды СНИИГГиМс. Новые данные по магматизму и ру-

- доносности Алтае-Саянской складчатой области. Серия: Закономерности размещения и образования полезных ископаемых. Вып. 70. Новосибирск, 1968. С. 155–159].
- Posokhov E.V., Tolstikhin N.I., 1977. Mineral Waters (Medical, Industrial, and Energy Waters). Nedra, Leningrad, 240 p. (in Russian) [Посохов Е.В., Толстухин Н.И. Минеральные воды (лечебные, промышленные, энергетические). Л.: Недра, 1977. 240 с.].
- Roslyakov N.A., Shcherbakov Yu.G., Alabin L.V., Nesterenko G.V., Kalinin A.Yu., Roslyakova N.V., Vasiliev I.P., Nevol'ko A.I., Osintsev S.R., 2001. Minerageny of the Junction of the Salair and Kolyvan-Tomsk Folded Zone. Geo Branch, Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 243 p. (in Russian) [Росляков Н.А., Щербаков Ю.Г., Алабин Л.В., Нестеренко Г.В., Калинин А.Ю., Рослякова Н.В., Васильев И.П., Неволько А.И., Осинцев С.Р. Минерогения области сочленения Салаира и Колывань-Томской складчатой зоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. 243 с.].
- Roslyakov N.A., Zhmodik S.M., Pakhomov V.G., 2013. Natural radionuclides in the geological medium of the Novosibirsk region. In: Radioactivity and radioactive elements in the human environment. Proceedings of the IV International conference (4–8 June 2013, Tomsk). Publishing House of Tomsk Polytechnic University, Tomsk, p. 461–464 (in Russian) [Росляков Н.А., Жмодик С.М., Пахомов В.Г. Естественные радионуклиды в геологической среде Новосибирской области // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы IV Международной конференции (4–8 июня 2013 г., г. Томск). Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. С. 461–464].
- Santos T.O., Bonotto D.M., 2014.  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and hydrochemistry in the Bauru Aquifer System, São José do Rio Preto (SP), Brazil. *Applied Radiation and Isotopes* 86, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.12.003>.
- Sotnikov V.I., Fedoseev G.S., Kungurtsev L.V., Borisenko A.S., Obolensky A.A., Vasiliev I.P., Gimon V.O., 1999. Geodynamics, Magmatism and Metallogeny of the Kolyvan-Tomsk Folded Zone. Publishing House of SB RAS, SRC UIGGM, Novosibirsk, 227 p. (in Russian) [Сотников В.И., Федосеев Г.С., Кунгурцев Л.В., Борисенко А.С., Оболенский А.А., Васильев И.П., Гимон В.О. Геодинамика, магматизм и металлогения Колывань-Томской складчатой зоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999. 227 с.].
- Sotnikov V.I., Fedoseev G.S., Ponomarchuk V.A., Borisenko A.S., Berzina A.N., 2000. Granitoid complexes of the Kolyvan-Tomsk folded zone (West Siberia). *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 41 (1), 120–125.
- Sukhorukova A.F., Novikov D.A., 2018. Hydrogeology of Zaeltsovsko-Mochishchensky zone of radon waters (Novosibirsk). In: Groundwaters of the eastern regions of Russia. Materials of the All-Russia conference on groundwaters of the eastern regions of Russia (XXII Meeting on groundwaters of Siberia and the Far East, with international participation) (18–22 June 2018, Novosibirsk). Publishing Center of Novosibirsk State University, Novosibirsk, p. 473–480 (in Russian) [Сухорукова А.Ф., Новиков Д.А. Гидрогеология Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод (г. Новосибирск) // Подземные воды востока России: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам востока России (XXII Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием) (18–22 июня 2018 г., г. Новосибирск). Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018. С. 473–480].
- Surkov V.S., Trofimuk A.A., Zhero O.G., Smirnov L.V., Kontorovich A.E., Kanareikin B.A., Karus E.V., Kovylin V.M., Kramnik V.N., Rudnitsky A.L., Strakhov A.N., Egorkin A.V., Chernyshov N.M., 1986. Megacomplexes and Deep Structure of the Earth's Crust of the West Siberian Plate. Nedra, Moscow, 149 p. (in Russian) [Сурков В.С., Трофимук А.А., Жеро О.Г., Смирнов Л.В., Конторович А.Э., Канарейкин Б.А., Карус Е.В., Ковылин В.М., Крамник В.Н., Рудницкий А.Л., Страхов А.Н., Егоркин А.В., Чернышов Н.М. Мегакомплексы и глубинная структура земной коры Западно-Сибирской плиты. М.: Недра, 1986. 149 с.].
- Telahigue T., Agoubi B., Souid F., Kharroubi A., 2018. Groundwater chemistry and radon-222 distribution in Jerba Island, Tunisia. *Journal of Environmental Radioactivity* 182, 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.11.025>.
- Tsaruk I.I., Dundukov N.N., 2015. Main stage of creation of the mineral resource base of uranium in Russia and the neighbouring countries. *Razvedka i Okhrana Nedr (Exploration and Protection of Mineral Resources)* (10), 3–17 (in Russian) [Царук И.И., Дундуков Н.Н. Основные вехи создания минерально-сырьевой базы урана России и ближнего зарубежья // Разведка и охрана недр. 2015. № 10. С. 3–17].
- Varkasin Yu.N., Sviridov V.G., Roslyakov N.A., Afanasiev A.T., Vavilikhin G.A., Vasiliev I.P., Vinichenko V.I., Leonov A.N., Marus A.I., Mikhantjeva L.S., Nesterenko G.V., Samsonov G.L., Serdyuk Z.Ya., 1998. Geological Structure and Mineral Resources of West Siberia. V. II. Minerals. Publishing House of SB RAS, SRC UIGGM, Novosibirsk, 254 p. (in Russian) [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. Т. II. Полезные ископаемые. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1998. 254 с.].
- Verigo E.K., Bykov V.V., Gusev V.K., 1979. Zaeltsovskoe deposit of radon waters (Novosibirsk Priobye). In: G.A. Selyatitsky (Ed.), New data on geology and mineral resources of West Siberia. Issue 14. Publishing House of Tomsk University, Tomsk, p. 47–51 (in Russian) [Вериго Е.К., Быкова В.В., Гусев В.К. Заельцовское месторождение радоновых вод (Новосибирское Приобье) // Новые данные по геологии и полезным ископаемым Западной Сибири. Вып. 14 / Ред. Г.А. Селятицкий. Томск: Изд-во Томского университета, 1979. С. 47–51].
- Vladimirov A.G., Babin G.A., Fedoseev G.S., Kruk N.N., 2001. Novosibirsk district. In: Geology, magmatism and metamorphism of western part of Altai-Sayan fold region: field excursion guide of the IGCP-420. Geo, Novosibirsk, p. 26–38.
- Voronov A.N., 2004. Radon-rich waters in Russia. *Environmental Geology* 46 (5), 630–634. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0857-3>.

Yafasov A.Ya., Yafasov A.A., 2003. Radon fields in the territory of Central Asia. *ANRI* (3), 13–17 (in Russian) [Яфасов А.Я., Яфасов А.А. Радоновые поля на территории Центральной Азии // *АНРИ*. 2003. № 3. С. 13–17].



**Дмитрий Анатольевич Новиков**, канд. геол.-мин. наук, зав. лабораторией  
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН  
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия  
Новосибирский национальный исследовательский государственный университет  
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

✉ e-mail: [NovikovDA@ipgg.sbras.ru](mailto:NovikovDA@ipgg.sbras.ru)

**Dmitry A. Novikov**, Candidate of Geology and Mineralogy, Head of Laboratory  
A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS  
3 Academician Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russia  
Novosibirsk State University  
2 Pirogov street, Novosibirsk 630090, Russia



**Анна Федоровна Сухорукова**, канд. геол.-мин. наук, н.с.  
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН  
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия  
Новосибирский национальный исследовательский государственный университет  
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

e-mail: [SukhorukovaAF@ipgg.sbras.ru](mailto:SukhorukovaAF@ipgg.sbras.ru)

**Anna F. Sukhorukova**, Candidate of Geology and Mineralogy, Researcher  
A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS  
3 Academician Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russia  
Novosibirsk State University  
2 Pirogov street, Novosibirsk 630090, Russia



**Татьяна Владимировна Корнеева**, канд. геол.-мин. наук, н.с.  
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН  
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия

e-mail: [KorneevaTV@ipgg.sbras.ru](mailto:KorneevaTV@ipgg.sbras.ru)

**Tatiana V. Korneeva**, Candidate of Geology and Mineralogy, Researcher  
A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS  
3 Academician Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russia