



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 553.7:504.4 (470.1)

DOI: 10.19110/geov.2024.10.2

Минеральные источники Янейтывисского месторождения минеральных подземных вод (Республика Коми)

Т. П. МитюшеваИнститут геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия
mityusheva@geo.komisc.ru

В районе Янейтывисского месторождения минеральных подземных вод на гряде Чернова опробованы три группы источников с минерализацией 2.3–3.0 г/л и поверхностные воды. Месторождение минеральных вод наиболее крупное по разведанным запасам в Арктической зоне России, не эксплуатируется. Воды источников субкриогенного нижнекаменноугольного водоносного комплекса слабощелочные, маломинерализованные, хлоридные кальциево-натриевые. Установлено изменение анионного состава вод при постоянстве гидрохимического ClCa-типа. Впервые изучен изотопный состав вод Янейтывисского источника ($\delta D - 111.9... - 109.2$ ‰ (SMOW), $\delta^{18}O - 15.78... - 15.15$ ‰ (SMOW), по значениям они близки термоминеральным водам источников на р. Пымвашор на гряде Чернышева. В формирование состава минеральных вод источников различный вклад вносят пресные воды современных атмосферных осадков, сформированные в условиях холодного климата, и талые воды от деградирующей многолетнемерзлой толщи, а также соленые хлоридно-натриевые воды морского (смешанного) генезиса водоносного комплекса карбонатных отложений нижнего карбона. Поверхностные воды Большеземельской тундры в районе источников имеют разнообразный состав (HCO_3 Ca–Mg, HCO_3 –Cl Ca–Na, Cl Na–Ca, Cl– HCO_3 Mg), установлено их загрязнение микроэлементами природного и техногенного происхождения.

Ключевые слова: источник, подземные воды, минеральные воды, гидрохимия, изотопный состав, гряда Чернова

Mineral springs of the Yaneytyvis deposit of mineral waters (Komi Republic)

T. P. Mityusheva

Institute of Geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

In the area of the Yaneytyvis deposit of mineral waters on the Chernov Ridge, three groups of springs with mineralization of 2.3–3.0 g/l and surface waters were tested. The mineral water deposit, the largest in terms of proven reserves in the Arctic zone of Russia, is not exploited. The mineral waters of the springs of the subcryogenic Lower Carboniferous aquifer complex are weakly alkaline, low-mineralized, calcium-sodium chloride. A change in the anionic composition of the waters (a decrease in the proportion of sulfate ion) was established with a constant Cl Ca hydrochemical type. The first data were obtained on the isotopic composition of the mineral waters of the Yaneytyvis springs ($\delta D - 111.9... - 109.2$ ‰ (SMOW), $\delta^{18}O - 15.78... - 15.15$ ‰ (SMOW), values are close to the thermomineral waters of the springs on the Pymvashor River on the Chernyshev Ridge. Various types of water participate in the formation of the composition of the mineral waters of the springs: fresh waters of modern atmospheric precipitation formed in cold climates and melt waters from degrading permafrost, as well as salty chloride-sodium waters of marine (mixed) genesis of the aquifer complex of carbonate deposits of the Lower Carboniferous. Surface waters of the Bolshzemelskaya tundra in the area of the springs have a diverse composition (HCO_3 Ca–Mg, HCO_3 –Cl Ca–Na, Cl Na–Ca, Cl– HCO_3 Mg), their pollution with microelements of natural and technogenic origin has been established.

Keywords: Yaneytyvis spring, underground water, mineral water, hydrochemistry, isotopic composition, Chernov ridge

Введение

В пределах узкой сложнопостроенной линейно-складчатой субширотной структуры гряды (поднятия) Чернова (Тектоника..., 1989) в северной части Предуральского краевого прогиба сосредоточены большие ресурсы пресных и минеральных подземных вод, связанные с разновозрастными осадочными палеозойскими отложениями. Здесь находятся (Гидрогеология..., 1970; Лечебно-минеральные..., 1983; Митюшева, 2016)

немногочисленные соленые источники: Табейшор, Салаю, Янейтывисский, Воркутские сероводородные. Эти групповые выходы подземных минеральных вод на поверхность в пределах гряды связаны с повышенной трещиноватостью и проницаемостью пород в зонах разрывных нарушений. Степень изучения соленых ключей (родников) севера Предуральского краевого прогиба различна, и большая часть остается малоизученной, несмотря на то, что они известны уже более

Для цитирования: Митюшева Т. П. Минеральные источники Янейтывисского месторождения минеральных подземных вод (Республика Коми) // Вестник геонаук. 2024. 10(358). С. 12–27. DOI: 10.19110/geov.2024.10.2

For citation: Mityusheva T. P. Mineral springs of the Yaneytyvis deposit of mineral waters (Komi Republic). Vestnik of Geosciences, 2024, 10(358), pp. 12–27, doi: 10.19110/geov.2024.10.2



150 лет. Первые особо ценные сведения о сероводородных и соленых источниках около д. Адак привел В. Н. Латкин (1848), о минеральных «теплых и горячих» ключах на правом притоке р. Адзвы, на речке Пымвашор — архимандрит Веньямин (1849), А. В. Журавский (1906), Н. А. Кулик (1909). Сведения о минеральных источниках гряд Чернова и Чернышева Предуральского прогиба включены в сводки по минеральным водам Коми АССР и Ненецкого национального округа А. А. Скрябина и В. И. Смирнова (1939), Е. В. Ртищевой (1953), Е. Д. Соловьевой и Н. Ф. Сергеевой (1962), тома XLII «Гидрогеологии СССР» (1970), Г. Д. Сосновской и М. П. Найшулер (1981), Л. В. Мигунова и др. (1983), В. М. Милькова и др. (1989, 1993).

Благодаря уникальному для Европейского Севера химическому и газовому составу, наиболее исследованы термоминеральные солоноватые (1.7–2.1 г/л) источники гряды Чернышева на р. Пымвашор (Гидрогеология..., 1970; Митюшева и др., 2012), находящиеся в Ненецком автономном округе. Неутвержденные запасы лечебных хлоридно-натриевых питьевых и радонорадиевых бальнеологических вод, приуроченных к зоне трещиноватости закарстованных верхнедевонско-нижнекаменноугольных известняков, составили 2.8 тыс. м³/сут. Единственным разведанным и состоящим на учете государства (Государственный..., 2023) месторождением минеральных подземных вод (ММПВ) за Северным полярным кругом является Янейтивисское.

Уникальность Янейтивисского ММПВ в том, что этот район находится в зоне развития многолетнемерзлых пород. В области вечной мерзлоты выходы минеральных вод на поверхность известны больше как достопримечательные туристические объекты и «дикие» лечебные места. Примером могут быть многочисленные термальные минеральные источники Чукотки (Поляк и др., 2022). Функционирует в Российской Арктике единственный санаторий «Талая» (287 км от г. Магадан), где для бальнеолечения используются термальные (до +98 °С) азотные кремнистые хлоридно-гидрокарбонатные натриевые воды среднеюрских терригенных и верхнеюрских вулканогенных пород с минерализацией 0.5–0.6 г/л месторождения Тальское-1 (Государственный..., 2023; Завгородушко и др., 2020).

Целью работы является характеристика природных источников минеральных вод на площади Янейтивисского месторождения по состоянию на 2021 г., оценка изменения химического состава вод во временном разрезе за полувековой период и возможности использования минеральных вод в современных условиях, уточнение распространенности химических элементов и условий формирования состава минеральных вод источников.

Общие сведения

Янейтивисские минеральные источники и разведенное одноименное месторождение минеральных вод расположены в 30 км от г. Воркуты (рис. 1), в месте слияния рек Яней-Ты-Вис и Воргашор. Источники приурочены к зоне разрывных нарушений — Янейтивисскому взбросу на южном крыле поднятия Чернова.

Первые сведения о солоноватых источниках на устье р. Воргашор были приведены в 1959 г. Л. В. Лобко-

вой и затем Б. М. Зимаковым¹ (1961) был опробован Усть-Воргашорский источник (Воргашорская группа источников) на правом берегу р. Янейтивис. На участке естественных выходов минеральных вод на поверхность земли инженерно-геологической партией ПГО «Полярноуралгеология» в 1973–1978 гг. были проведены поиски и детальная разведка минеральных вод^{2, 3}. Были пробурены скважины № ВК-492, ВК-493, ВК-494, ВК-495 глубиной 89.9; 192; 172 и 502 м соответственно, вскрывшие водоносную зону трещиноватости в карбонатных каменноугольных породах. Работы по разведке минеральных вод проводились по заявке Воркутинского горисполкома в связи с удаленностью от курортов страны и трудностью завоза лечебно-столовых вод из других областей. Потребность в минеральных водах, которые планировалось использовать для розлива, составляла 50 м³/сут. Запасы лечебно-столовых вод Янейтивисского ММПВ были утверждены в 1978 г. в количестве 1020 м³/сут (в т. ч. по категориям: А — 482, В — 688 м³/сут). Согласно переоценке, проведенной в 2019 г. (Протокол ГКЗ от 25.12.2019 г. № 6171) (Государственный..., 2023), ранее утвержденные запасы Янейтивисского ММПВ серпуховско-визейского водоносного комплекса (С_{1s-v}) в интервале залегания 352–502 м были переведены в категорию «С₂» с сохранением объема 1020 м³/сут.

Климат местности, расположенной в 140 км от побережья Северного Ледовитого океана, характеризуется как субарктический; среднегодовые значения температуры за период 1991–2020 гг. по г. Воркуте — около –4.7 °С, количество осадков — 540 мм (Среднегодовые..., 2024). Абсолютные отметки земной поверхности в данном районе Большеземельской тундры — от 150 до 165 м.

Объекты исследования

Исследования Янейтивисского источника были проведены в июле 2021 г. сотрудниками Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Обследованы три группы холодных минеральных подземных источников (рис. 1, с, табл. 1), выходы которых локализованы на отрезке долины р. Янейтивис в месте слияния с р. Воргашор.

Отбор проб вод из скважин был невозможен, поскольку они законсервированы (затампонированы).

¹ Геохимия газов осадочной толщи полярной части Уральского краевого прогиба: Отчет / М.: МГРИ, 1961. Отв. исполн. Б. М. Зимаков. ГБУ РК «ТФИ РК», Сыктывкар. Инв. № 3120.

Geochemistry of gases of the sedimentary strata of the polar part of the Ural foredeep: Report. Territorial Geological Funds of the Komi Republic, Syktyvkar. Moscow: MGRI, 1961, Exec. B. M. Zimakov, No, 3120 (in Russian)

² Отчет по поискам минеральных вод в районе поднятия Чернова: Отчет / Воркута, 1977. Отв. исполн. И. А. Конжин, А. К. Подвальный. ГБУ РК «ТФИ РК», Сыктывкар. Инв. № 4961.

Prospecting for mineral waters in the area of the Chernov Swell: Report Territorial Geological Funds of the Komi Republic, Syktyvkar. Vorkuta, 1977. Exec. I. A. Konzhin, A. K. Podvalny, No. 4961. (in Russian)

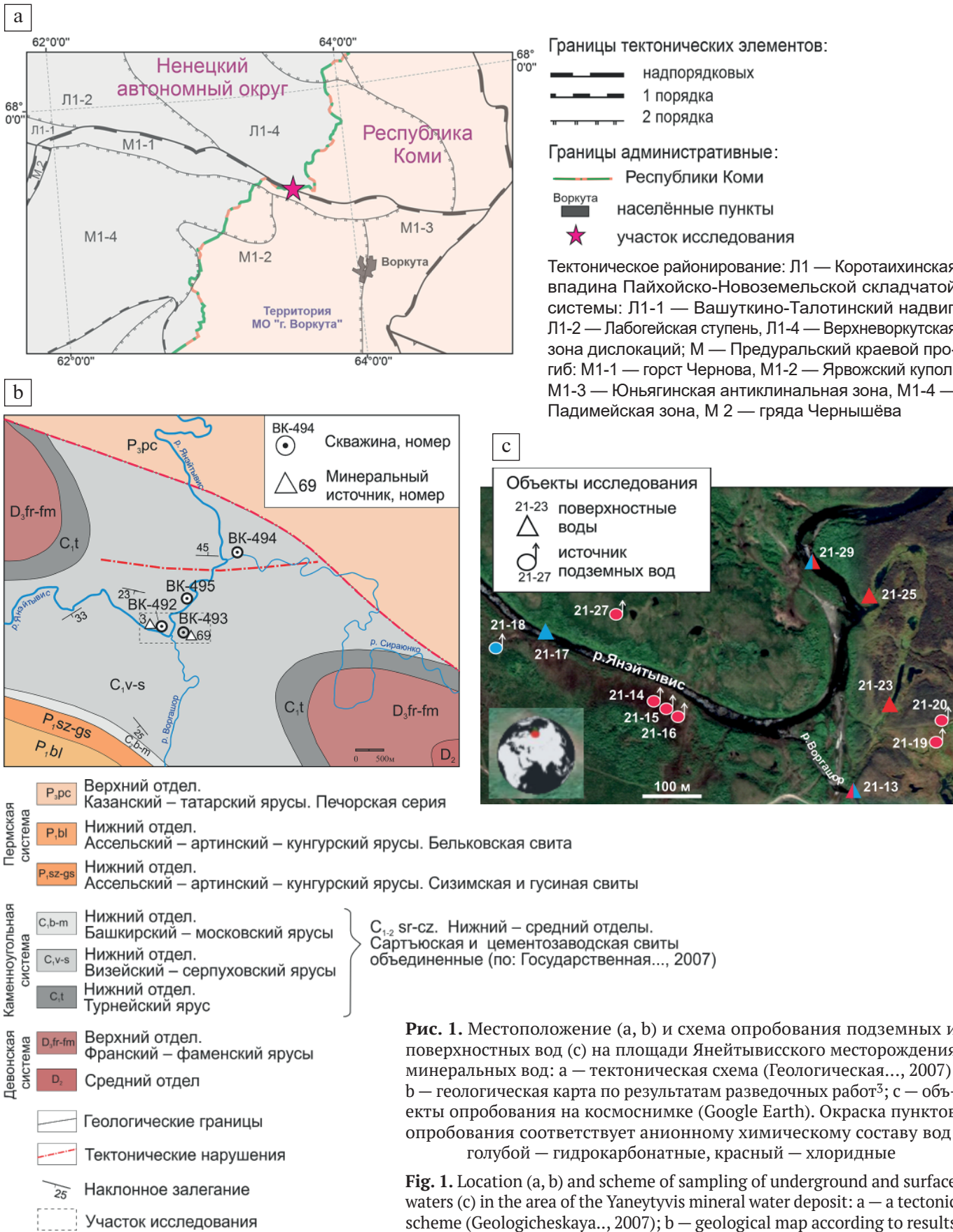


Рис. 1. Местоположение (а, б) и схема опробования подземных и поверхностных вод (с) на площади Янейтывисского месторождения минеральных вод: а — тектоническая схема (Геологическая..., 2007); б — геологическая карта по результатам разведочных работ³; с — объекты опробования на космоснимке (Google Earth). Окраска пунктов опробования соответствует анионному химическому составу вод: голубой — гидрокарбонатные, красный — хлоридные

Fig. 1. Location (a, b) and scheme of sampling of underground and surface waters (c) in the area of the Yaneytyvis mineral water deposit: а — a tectonic scheme (Geologicheskaya..., 2007); б — geological map according to results of exploration work³; с — the sampling on the satellite image (Google Earth). The color of the sampling corresponds to the anionic chemical composition of the waters: blue — hydrocarbonate, red — chloride

³ Отчет по детальной разведке минеральных вод в районе поднятия Чернова: Отчет / Воркута, 1978. Отв. исполн. И. А. Конжин, М. Л. Кротов и др. ГБУ РК «ТФИ РК», Сыктывкар. Инв. № 5074.
 Report on the detailed exploration of mineral waters in the area of the Chernov Swell. Report. Vorkuta, 1978. Exec. I. A. Konzhin, M. L. Krotov et al. Territorial Geological Funds of the Komi Republic. Syktyvkar. No. 5074 (in Russian)



Первая группа минеральных источников представляет линейный выход подземных вод на правом берегу р. Янэйтывис на высокой пойме в 30–50 м от русла и включает три точки наблюдения (далее — т. н.): 21–14, 21–15 и 21–16. Между этими источниками 10–20 м. Площадка выходов подземных вод заболочена, под дерново-растительным слоем залегает прослой (6 см) супеси серо-коричневой на серых глинах с галькой. Вода источников солоноватая, имеет выраженный железистый привкус. Координаты и параметры, определенные при полевых работах приведены в таблице 1.

Вторая группа минеральных источников находится на второй надпойменной террасе р. Янэйтывис в 240 м от устья р. Воргашор (670 м от источников 1 группы). Подземные воды разгружаются в виде грифонов с общим дебитом более 10 л/с (т. н. 21-19) и скапливаются в водоеме 1.5 × 1.5 м. Далее происходит сток этих солоноватых вод по склону в старичное озеро (т. н. 21-23) размером 80 × 10 м у основания террасы в 80 м от реки. В 30 м от т. н. 21-19 находится другой высокодебитный источник (групповой выход) (т. н. 21-20), вода накапливается в водоеме 1.5 × 1.5 м. Этот источник (рис. 1, с) в период разведочных работ был оборудован, здесь осуществлялись режимные наблюдения (рис. 1, b — ист. 69). Ранее именно он именовался как Усть-Воргашорский. Законсервированная скважина ВК-493 находится в 20 м от т. н. 21-20. По всей длине поверхностного стока (ручейка) от источника наблюдаются многочисленные выходы подземных газифицированных вод. Водоток от источника разгружается в старичное озеро, которое большей частью заболочено; в открытых участках водоема электропроводимость вод достигает 4.46 См/см. Длина стока от минеральных источников до реки 500–550 м. Водоток, втекающий в реку, имеет общий расход 12 л/с (1002 м³/сут), он вытекает из старичных озер, собирающих стоки минеральных вод от источников. Точка наблюдения 21-25 характеризует место впадения водотока шириной 60 см в р. Янэйтывис. В целом окружающая местность на террасе сильно заболочена, отмечаются многочисленные

озерца различного размера с пресной или слабоминерализованной (удельная электропроводимость до 2.5 См/см) водой.

Третья группа минеральных источников находится на левом борту р. Янэйтывис в 50–80 м от реки. Здесь на заболоченной площадке поймы воды скапливаются в нескольких водоемах различного размера, электропроводимость различна: 0.7–3.7 См/см. Один из крупных выходов минеральных вод возник на месте ликвидированной скважины ВК-492. Отобрана проба вод (т. н. 21-27) из высокодебитного родника, на котором в период разведочных работ осуществлялись режимные наблюдения. Дебит ист. 3 (рис. 1, b) в 1977–78 гг. был 1.2 л/с.

Пресные подземные воды участка обследований характеризует проба из источника (т. н. 21-18) на правом берегу р. Янэйтывис. Восходящий единичный выход подземных вод осуществляется в 100 м от реки, он отличается низкими значениями температуры и минерализации вод (табл. 1).

Речные воды на данном участке отобраны из р. Янэйтывис и ее правого притока р. Воргашор с глубины 0.2–0.3 м от поверхности. Река Янэйтывис является правым притоком р. Воркуты (бассейн р. Печоры), берет начало ≈ в 8 км из о. Янэйти. Она имеет выраженную долину, ширина русла 6–10 м, глубина от 20 см в районе переката и до 3 м. После впадения р. Воргашор русло реки меняет направление почти на 90 градусов (рис. 1, b, c). Две пробы характеризуют реку: выше по течению исследованных источников третьей группы (т. н. 21-17) и ниже стока минерализованных вод (т. н. 21-29). Отбор пробы воды из р. Воргашор (т. н. 21-13) произведен на 200 м выше устья; ширина русла 5 м, глубина не более 30 см.

Материалы и методы исследований

В работе представлены результаты изучения природных вод в районе Янейтывисского ММПВ. В полевых условиях температуру и удельную электропроводимость поверхностных и подземных вод измеряли

Таблица 1. Объекты исследования природных вод

Table 1. Objects of natural water research

	Объект исследования Research object	Номер образца* Sample number*	Координаты Coordinates		t, °C	Электропроводимость, См/см Electrical conductivity, S/cm
			N	E		
Подземные воды Underground water	1-я группа минеральных источников 1st group of mineral springs	21-(14-16)	67°41'28.8''	63°42'35.0''	3.5–3.7	1.91–4.95
	2-я группа минеральных источников 2nd group of mineral springs	21-19	67°41'28.2''	63°42'11.7''	5.6	4.59
		21-20	67°41'29.1''	63°42'13.2''	5.2	4.56
	3-я группа минеральных источников 3rd group of mineral springs	21-27	67°41'32.5''	63°41'37.7''	3.0	3.68
	пресный источник / fresh water spring	21-18	67°41'32.0''	63°41'15.0''	1.8	0.29
Поверхностные воды Surface waters	р. Воргашор / Vorgashor river	21-13	67°41'23.9''	63°42'01.2''	15.5	0.47
	р. Янэйтывис Yaneytyvis river	21-17	67°41'31.5''	63°41'32.3''	16.2	0.09
		21-29	67°41'36.4''	63°41'58.7''	15.7	0.23
	озеро старичное / oxbow lake	21-23	67°41'35.1''	63°42'25.7''	16.5	1.8
	водоток из старичных озер water flow from oxbow lakes	21-25	67°41'35.9''	63°42'04.0''	13.0	3.75

Примечание. * — номер образца соответствует номеру на рис. 1, с.

Note. * — the sample number corresponds to the number in Fig. 1, c.

тестером HI 98129/98130 (Hanna Instruments, Португалия). Отбор проб воды осуществлялся в пластиковые контейнеры (после предварительного ополаскивания не менее трех раз отбираемой для анализа водой) после фильтрования через фильтр производства фирмы Schleicher & Schuell (Германия) с размером пор 0.45 мкм. Для определения общего химического состава объем пробы составлял 1.0 л, микроэлементного — 15–50 мл. Консервация для исследования катионов и микроэлементов производилась по стандартным методикам концентрированной HNO_3 . Пробы вод для изучения изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) были отобраны в пластиковые контейнеры объемом 10–15 мл.

Определение макрокомпонентного состава вод проведено в экоаналитической лаборатории Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар) в соответствии с аттестованными методиками: HCO_3^- — методом концентрации ионов, Cl^- — методом потенциометрического титрования; SO_4^{2-} — турбидиметрическим методом; NH_4^+ и NO_3^- — фотометрическим методом; Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ — на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой Spectro CIROS CCD (Германия). Сухой остаток определен гравиметрическим методом, величина pH — потенциометрическим. Общий органический углерод — по методу NPOC, ТОС — по методу термокаталитического окисления. Концентрации 64 элементов анализировались методами ICP-MS и ICP-OES на приборах: масс-спектрометре Agilent 7700x (Agilent Technologies, США) и оптико-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой Vista MPX Rad (Австралия) в Центре коллективного пользования «Геонаука» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар). Анализ изотопного состава вод ($\delta^{18}\text{O}$, δD) проведен в ЦКП Геологического института РАН (Москва) на приборе Picarro 2140i (лазерный анализатор изотопного состава O и H).

Название химического состава вод приведено по составу основных анионов и катионов, содержания которых превышают 20 %-экв. в возрастающем порядке.

Оценка пластовых температур формирования солевого состава вод проводилась по гидрохимическим геотермометрам, которые возможно применять для относительно низких температур: *SiO₂, Na-Li, K-Mg*. Для расчета использовались результаты химического анализа воды, выраженные в мг/л. Расчеты температуры по SiO_2 -геотермометру для диапазона температур 25–250 °C производились по формуле: $T\text{ °C} = 1522 / (5.75 - \lg\text{SiO}_2) - 273.15$ (Fournier, 1977). К-Mg-геотермометр (Giggenbach, 1988) используется для гидротермальных систем с температурой 50–300 °C: $T\text{ °C} = 4410 / (14 + \lg(\text{K}^2/\text{Mg})) - 273.15$. Na-Li-геотермометр разработан для оценки температур пластовых (от 20 до 340 °C) слабо- и умеренно минерализованных вод осадочных бассейнов: $T\text{ °C} = 1000 / (\lg(\text{Na}/\text{Li}) - 0.14) - 273.15$ (Fouillac, Michard, 1981).

Характеристика гидрогеологических условий

В изучение мерзлотных и гидрогеологических особенностей данной территории поднятия Чернова начиная с 60-х годов XX в. внесли вклад А. П. Мельник и Ю. В. Николаев (1961), И. Г. Соловьев (1962), О. П. Овчинников (1967), Н. Г. Оберман (1969) и другие исследова-

тели. Наиболее полные данные о геологическом строении Янейтывисского ММПВ были получены при поисково-разведочных работах 1973–1978 гг., направленных на оценку запасов минеральных вод^{2, 3}. Опираясь на результаты работ этих исследователей мы приводим краткую гидрогеологическую характеристику подразделений данного участка исследований, входящего в соответствии с районированием (Государственная..., 2007) в Полярно-Северопредуральскую систему артезианских бассейнов (АИ) (первого порядка). Территория охватывает погруженную часть поднятия Чернова (рис. 1, а, б), осложнена тектоническими нарушениями различной амплитуды, которые являются ответвлениями Янейтывисского взброса «Н». Взброс имеет северо-западное (пай-хойское) простирание, ограничивает гряду с севера, его амплитуда достигает 4 км, образование относят к послетриасовому времени.

Неоген-четвертичный таликово-криогенный водоносный комплекс (N-Q) имеет повсеместное распространение и представлен озерными, ледниковыми, ледниково-морскими, аллювиально-морскими и аллювиальными отложениями различного литологического состава. Комплекс включает грубые валунные суглинки, песчаные алевролиты падимейской серии (ранее — свиты) (*m, gmN₂pd*); алевролиты с галькой и гравием, суглинки с прослойками глин роговской серии (*gm, lgE-Ird*) и аллювиальные иловые пески, песчано-галечные и валунные отложения; озерно-болотные отложения — торф, песок, супесь, суглинок; покровные суглинки неоплейстоцен-голоцена (*a, lpII-H*). Установленная мощность отложений — от 2 м в зонах распространения карбонатных пород и до 72 м в пойме р. Янейтывис. Типичный состав вод инфильтрационного генезиса зоны активного водообмена в пределах поднятия Чернова — гидрокарбонатный кальциево-магниевый или кальциево-натриевый с минерализацией 0.1–0.5 г/л. В районе Янейтывисского месторождения, на участках разгрузки минеральных вод, воды неоген-четвертичного водоносного комплекса приобретают хлоридный или гидрокарбонатно-хлоридный кальциево-магниевый состав, их минерализация возрастает до 0.8 г/л.

Субкриогенный водоносный комплекс отложений нижнего карбона (*C₁v-s*) (рис. 1, б) включен в Воркутинском районе в объединенные сартъюскую и цементнозаводскую свиты (*C₁₋₂sr+cz*) (Государственная..., 2007). Подземные воды распространены в закарстованных, кавернозных, трещиноватых, серых, мелко- и (реже) среднезернистых известняках, часто кремнистых, участками доломитизированных. Отложения вскрыты скважинами на глубинах свыше 9–63.5 м. Мощность залегающих под углом 12° и более пород больше 430 м, простирание — субширотное. Максимальная трещиноватость известняков развита до глубины 100 м и прослеживается до 300 м, где удельные дебиты скважин достигают 3.7 л/с. Ниже по разрезу (до 500 м) снижается трещиноватость, водопроницаемость и удельный дебит становится менее 0.5 л/с. Трещины как пустые, так и залеченные кальцитом, глинистым и песчаным материалом, встречаются гнезда и друзы выщелачивания, заполненные кристаллами кальцита, доломитовой мукой с включениями мелкого щебня и дресвы известняка, кристаллами пирита, лимонита, реже кварца. Установлена высокая (до 30–50 %) кавер-



нозность пород, в скважинах выявлены каверны размером 0.1–0.3 м и до карстовых полостей 5–15 м и более. Коэффициент водопроницаемости пород по скв. ВК-495 составил 330 м²/сут, проницаемости — 1.21·10⁴ м²/сут. В скважине ВК-495 в интервале глубин 341–385 м было выявлено три зоны тектонической трещиноватости и дробления, связанные, вероятно, с дизъюнктивами, опережающими Янейтывисский взброс и служащими каналами для миграции глубинных вод. Разгрузка высоконапорных минеральных вод водоносного комплекса происходит в долинах рек.

В таблице 2 приведены результаты общего анализа подземных вод по данным опробования водоносного комплекса скважинами ВК-492, ВК-493 и ВК-495. Было установлено, что в районе источников сформирована локальная гидрохимическая зональность, минерализация вод увеличивалась с глубиной. Например, в скв. ВК-493 по всему разрезу воды солоноватые: на глубине 52 м — 2.7 г/л, ниже 192 м — до 3.3 г/л. Только в скв. ВК-494 до глубины 160 м воды были пресные — 0.5 г/л, а ниже 172 м — до 1.5 г/л. На остальной территории гряды Чернова солоноватые хлоридно-натриевые минеральные воды распространены на глубинах свыше 500–550 м.

Химический состав трещинно-карстовых минеральных вод карбонатных отложений Янейтывисского ММПВ в период поисково-разведочных работ был сульфатно-хлоридный кальциево-натриевый, солесодержание — 1.5–3.4 г/л на фоне пресных (0.3–0.6 г/л) гидрокарбонатных магниево-кальциевых вод зоны активного водообмена поднятия Чернова. В водах скв. ВК-493 выявлены микрокомпоненты (мг/л): фтор (0.2), бром (2.2–4.8) бор (1.4–4.7), литий (0.12), стронций (2.7), кремниевая кислота (7.8–13.7).

Воды месторождения по действовавшему на то время ГОСТу 2874-73 «Минеральные воды» относились к группе минеральных вод «без специфических компонентов и свойств», с концентрацией биологически активных компонентов ниже установленных норм. В соответствии с полученным в 1978 г. бальнеологическим заключением воды Янейтывисского месторождения (скв. ВК-495, инт. 352–502 м) являлись близким аналогом лечебно-столовой воды «Алма-Атинская» (Курамский источник № 8, Казахстан).

Как было указано, данная территория располагается в зоне развития многолетнемерзлых пород. В пределах Янейтывисского месторождения мерзлота установлена по бортам речных долин от поверхности до глубины 4 м и при удалении от речного русла до 56 м. Многолетнемерзлые породы под долинами рек Янейтывис и Воргашор отсутствуют (сквозной талик), что обусловлено тепляющим воздействием изливающихся в долине и субаквально напорных подземных минерализованных вод. Была установлена гидравлическая связь р. Янейтывис с подземными минеральными водами, это обуславливает и фонтанирование скважин в летне-осенний период высокого положения уровня.

Температура подмерзлотных вод колеблется в пределах 1.8–6.2 °С. В скв. ВК-495 по результатам замеров температуры в период разведочных работ величина геотермического градиента росла от 0.4 до 1.4 °С на 100 м. На глубинах свыше 400 м, где отсутствует влияние мерзлоты, геотермический градиент равен 2 °С на 100 м. В скважинах 4-Падимейская и 1-Норейшорская (наи-

более близкие по местоположению глубокие скважины, вскрывшие водоносные комплексы каменноугольных и девонских отложений) геотермический градиент на глубинах 1.7–2.4 км возрастает до 2.8–3.3 °С на 100 м.

Результаты исследований и обсуждение

Результаты определения химического состава вод минеральных источников, изученных в 2021 г., приведены в таблицах 2, 3 и на рисунке 2. Для сравнения во временном разрезе показаны данные, полученные ранее, в 1959 и 1977 гг.

Минеральные воды исследованных источников всех трех групп по анионному составу являются хлоридными с повышенным содержанием сульфат-иона (16–17 %-экв.), по катионному — кальциево-натриевыми (рис. 2). Наблюдается превышение концентраций ионов Cl⁻ над Na⁺ более чем в два раза, кальция над магнием Ca/Mg — 3.5–3.6. Концентрация ионов HCO₃⁻ в водах источников варьирует от 172 до 231 мг/л. В незначительных количествах содержатся NO₃⁻ (0.01–0.19 мг/л) и NH₄⁺ (0–0.15 мг/л).

Общая минерализация вод определена в пределах 2.3–3.0 г/л, что квалифицирует их (ГОСТ Р 54316-2020, Об утверждении..., 2021) как маломинерализованные. Наибольшее солесодержание наблюдается в источниках первой и второй групп (т. н. 21-16, 21-19 и 21-20). Величина рН вод (7.3–7.6) характеризует слабощелочную реакцию среды. По показателю общей жесткости (17.6–24.8 мг-экв/л) воды очень жесткие, что обусловлено прежде всего карбонатным составом водовмещающих пород. Измеренные значения температуры подземных вод источников — 3.4–5.0 °С, что соответствует подгруппе «очень холодные — холодные» (Об утверждении..., 2021) при температуре поверхностных вод — 13.0–16.2 °С.

Опробованный источник 21-20, относимый нами ко 2-й группе минеральных источников, который ранее именовался как Усть-Воргашорский (Геохимия..., 1961)¹ и № 69 (Отчет по детальной..., 1978)³, имел сульфатно-хлоридный кальциево-натриевый состав и минерализацию 2.8 и 2.6–2.8 г/л соответственно. В 2021 г. минерализация вод источника незначительно (на 50 мг/л) была повышена относительно летних значений 1977 г. Химический состав вод за прошедший период (43 года) исследований (рис. 2) претерпел некоторую трансформацию, которая выражается в уменьшении количества сульфат-иона, и, как результат, сульфатно-хлоридный анионный состав стал хлоридным при сохранении состава основных катионов (Na-Ca). Тип вод не изменился. Содержание иона SO₄²⁻ (в %-экв.) снизилось с 19.9–21.5 до 17.2 (т. н. 21-20) и с 19.7–22.5 до 16.8 (т. н. 21-27). Полагаем, что потеря части растворенного сульфата возможна в результате процессов сульфат-редукции. Необходимо отметить, что на период разведочных работ концентрация иона SO₄²⁻ в водах источников была ниже, чем в скважинах ВК-493 и ВК-495 на глубинах 165–502 м.

Результаты исследования микрокомпонентного состава вод (табл. 3) показали обогащенность рядом микроэлементов в концентрациях более 0.1 мг/л: Si>Sr>B>Mn>Fe>Li>Ba. В водах также выявлены (мкг/л): 1–10·n (Pd, Cr, V, Al, Rb, Ni, Cu, Co) и 0.1–1·n (Pb, Mo, U, Y, Cs, Rh, La, Ce, Pr, Eu, Lu, Tm).

Таблица 2. Физико-химическая характеристика подземных минеральных вод

Table 2. Physicochemical characteristics of mineral groundwater

Параметры Parameters	Группы минеральных источников / Groups of mineral springs										
	1-я группа 1st group	2-я группа минеральных источников 2nd group of mineral springs				3-я группа 3rd group			Подземные воды нижнекаменноугольного водоносного комплекса (Отчет по детальной..., 1978) ³ Groundwater of the Lower Carboniferous aquifer complex (Report of the detailed..., 1978) ³		
	Точки наблюдения / Observation points							скважина ВК-495 инт. 352–502 м 31.05.1978 well VK-495 int. 352–502 м	скважина ВК-493 инт. 165–192 м 18.07.1977 well VK-493 int. 165–192 м	скважина ВК-492 инт. 14.5–98.9 м 18.07.1977 well VK-492 int. 14.5–98.9 м	
	21-16 17.07.2021	21-19 17.07.2021	21-20 17.07.2021	Усть-Воргашорский (Геохимия..., 1961) ¹ 19.09.1959 Ust-Vorgashor (Geochemistry..., 1961) ¹	69 режимный (Отчет по детальной..., 1978) ³ 21.07.1977 69 regime (Report of the detailed..., 1978) ³	21-27 18.07.2021	3 (Отчет по детальной..., 1978) ³ 21.07.1977 3 (Report of the detailed..., 1978) ³				
рН	7.6	7.5	7.3	7.4	7.45	7.4	7.5	7.2	7.05	7.0	
минерализация, мг/л Mineralization, mg/l	2964.1	2963.4	2913.9	2851.27	2765.68	2306.1	2676.2	3290.91	3435.61	2892.03	
сухой остаток, мг/л Dry residue, mg/l	3600	3600	3300	2808	2805.8	2610	2202	3104	3338	2796.9	
Na ⁺ , мг/л Na ⁺ , mg/l	450.0	570.0	590.0	572.24	570.26	440.0	534.78*	699.7	726.5	586.41	
NH ₄ ⁺	<0.01	0.15	<0.01	н. с.	н. с.	<0.01	н. с.	0.7	0.13	н. с.	
K ⁺	15.1	15.4	15.9	7.0	н. с.	13.10	*	14.0	н. с.	н. с.	
Ca ²⁺	340.0	310	310	308.0	290.60	240	280.6	316.4	346.7	304.6	
Mg ²⁺	95	87.0	86.0	83.68	86.28	68	82.64	94.0	97.22	88.71	
Cl ⁻	1482.0	1356.0	1310.0	1212.7	1191.20	1004	1134.5	1383.6	1489.0	1255.6	
SO ₄ ²⁻	410.0	410.0	400.0	451.0	432.08	310	436.19	562.9	562.1	456.76	
HCO ₃ ⁻	172.0	215.0	202.0	216.55	195.26	231	н. с.	219.6	195.26	189.15	
NO ₃ ⁻	0.19	0.01	0.04	н. с.	н. с.	0.10	н. с.	0	н. с.	н. с.	
H ₂ SiO ₃	13.47	17.06	17.36	14.0	н. с.	16.76	н. с.	7.8	н. с.	н. с.	
ТОС	0.38	<0.1	0.39	н. с.	н. с.	0.91	н. с.	н. с.	н. с.	н. с.	
CO ₂ расч	6.69	10.92	16.80	н. с.	н. с.	16.02	н. с.	23.04	н. с.	н. с.	

карбонатная щелочность ($r\text{HCO}_3^- + 2r\text{CO}_3^{2-}$) Carbonate alkalinity	2.82	3.52	3.31	3.55	3.38	3.79	3.4	3.6	3.2	3.1
$2r\text{Ca}^+$ / ($r\text{HCO}_3^- + 2r\text{CO}_3^{2-}$)	12.04	8.78	9.35	8.66	8.59	6.33	8.24	8.77	10.81	9.81
$r\text{Na}/r\text{Cl}$	0.47	0.65	0.70	0.73	0.74	0.68	0.73	0.78	0.75	0.72
$(r\text{Cl}-r\text{Na})/r\text{Mg}$	2.84	1.87	1.59	1.35	1.23	1.63	1.28	1.1	1.29	1.35
$r\text{Mg}^{**}/r\text{Cl}$	0.32	0.28	0.30	0.27	0.28	0.26	0.26	0.21	0.25	0.28
гидрохимический тип вод по В. А. Сулину Hydrochemical type of water according to V. A. Sulin	ClCa (хлоркальциевый при $r\text{Na}/r\text{C}<1$ и $(r\text{Cl}-r\text{Na})/r\text{Mg}>1$) ClCa (calcium chloride at $r\text{Na}/r\text{C}<1$ and $(r\text{Cl}-r\text{Na})/r\text{Mg}>1$)									

Примечания: ТОС — общий органический углерод; н. с. — нет сведений; r — содержание ионов в мг-экв./л;

* — совместное определение ионов натрия и калия; $r\text{Mg}^{**} = (r\text{Ca}+r\text{Mg})-(r\text{HCO}_3+r\text{SO}_4)$

Notes: TOC — Total organic carbon; н. с. — no data; r — ion content in mol/l;

* — joint determination of sodium and potassium ions; $r\text{Mg}^{**} = (r\text{Ca}+r\text{Mg})-(r\text{HCO}_3+r\text{SO}_4)$

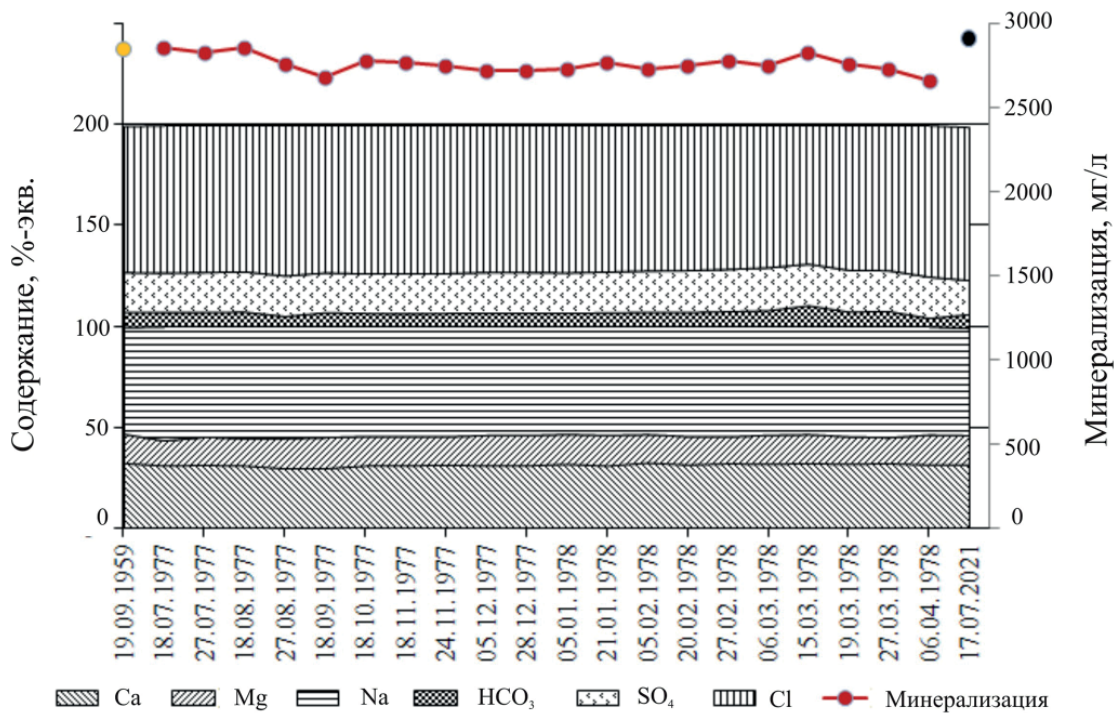


Рис. 2. Изменения химического состава и минерализации вод источника 21-20 за период 1959–2021 гг. Включены данные из неопубликованных работ Б. М. Зимакова (Геохимия..., 1961)¹ и И. А. Конжина и др. (Отчет по детальной..., 1978)³

Fig. 2. Changes in the chemical composition and mineralization of waters of spring 21-20 for the period 1959–2021. Data from unpublished works by B. M. Zimakov (Geochemistry..., 1961)¹ and I. A. Konzhin et al. (Report of the detailed..., 1978)³ are included

Воды источников всех трех групп, по данным обследования 2021 г., относятся к хлоркальциевому типу при $rNa/rCl < 1$, $(rCl - rNa)/rMg > 1$ (табл. 2). Несмотря на небольшую минерализацию, воды несут отпечаток морского генезиса, о чем свидетельствуют гидрохимические коэффициенты $rNa/rCl = 0.47-0.70$; $rMg^*/rCl = 0.26-0.32$; $(rCl - rNa)/rMg = 1.59-2.84$. Соотношения ионов, рассчитанные по анализам для вод нижнекаменноугольных отложений, опробованных скважинами в 1977 г. (табл. 2), показали в целом близкие величины: rNa/rCl (0.72–0.78), rMg^*/rCl (0.21–0.28), Cl/Br (288) и $(rCl - rNa)/rMg$ (1.1–1.35). Сопоставление этих коэффициентов проведено со значениями для морских вод — 0.87, 0.13, 297 и 6.57 соответственно.

Химический состав трещинно-карстовых исследованных минеральных вод отражает и взаимодействия вод и пород, литолого-геохимические свойства водовмещающих пород. О наличии связи с морским генезисом вод и вмещающих их толщ, являющихся поставщиком Ca, Sr и др. элементов, свидетельствуют повышенные содержания стронция 4.0–5.1 мг/л, а также отношение Ca/Sr (59.7–66.93). Для морской воды величина Ca/Sr составляет около 33, и накопление этих элементов, в большей степени кальция, происходит за счет выщелачивания и растворения известняков. Следовательно, изменение накопления в водах элементов (прежде всего Cl, Na, Ca, Mg) является результатом преобразований — процессов метаморфизации в прямом направлении, происходящих при взаимодействии вод седиментационных морских и смешанных с палеоинфильтрационными со вмещающими карбонатными породами. Влияние последующего разбавления на соотношение компонентов (гидрохимические коэффициенты) по мере подъема на поверхность за счет пресных вод зоны активного водообмена не

столь существенно. Разбавление вод выражается больше в уменьшении концентраций химических элементов. На основе данных ионного состава вод графоаналитическим методом по А. Н. Огильви было рассчитано (Отчет по детальной..., 1978)³, что минеральные воды Янейтивисского ММПВ сформированы в результате смешения восходящих глубинных высокоминерализованных (13.2 г/л) сульфатно-хлоридных вод с пресными (0.4–0.6 г/л) водами зоны активного водообмена в соотношении 3/4 пресных и 1/4 высокоминерализованных.

Данные гидрохимии по источникам стали исходными для оценки пластовых условий формирования солевого состава минеральных вод (температуры, глубины) (табл. 4). Рассчитанные значения по SiO_2 -, Na-Li-, K-Mg-геотермометрам, которые возможно применять для относительно низких температур, показали значительные различия. Для определения глубины залегания пластовых вод по полученным расчетным температурам использован геотермический градиент 2.8 °C/100 м. Наиболее достоверными считаем результаты, полученные по SiO_2 -геотермометру. Полагаем, что пластово-трещинные воды поступают с глубины более 1.6 км, где температура около 46–54 °C. Этому не противоречат данные по опробованию вод нижнекаменноугольного водоносного комплекса в скважине 4-Падимейская. В интервале глубин 1757–1767 м замеренная пластовая температура была 58 °C, минерализация хлоридных кальциево-натриевых вод — 10.2 г/л. В интервале 2410–2431 м минерализация пластовых вод — 11.9 г/л, температура — 68 °C.

На исследованном участке гряды Чернова в зону активного водообмена вовлечены карбонатные породы; восходящие напорные минеральные воды растворяют и выщелачивают их.



Результатом этого является закарстованность трещиноватых известняков и доломитизированных известняков, особенно в приконтактной зоне разломов, что и было выявлено при разведочном бурении скважин. С другой стороны, величина гидрохимического коэффициента $2rCa^{+}/(rHCO_3^{-} + 2rCO_3^{2-})$ больше единицы (табл. 2). При увеличении концентрации ионов кальция, превышающих карбонатную щелочность (Геохимия..., 2004), невысокие содержания водорастворенной CO_2 в водах источников (6.7–16.8 мг/л) свидетельствуют о вероятности осаждения $CaCO_3$. Этот процесс вторичного минералообразования в трещинах, кавернах и гнездах выщелачивания известняков — залечивание их кальцитом — также зафиксирован по керну скважин.

Впервые полученные данные изотопного состава (δD , $\delta^{18}O$) минеральных вод янейтывисских источников свидетельствуют об их преимущественном питании водами с низкими показателями δD –111.9... –109.2 ‰ (SMOW) и $\delta^{18}O$ –15.78... –15.15 ‰ (SMOW) (рис. 3). Эти значения располагаются практически на глобальной линии метеорных вод ($\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10$) (Craig, 1961). В сравнении с изотопным составом пластовых вод каменноугольно-нижнепермского водоносного

комплекса Печорской впадины, изученных Ю. Б. Селецким и др. (1990)⁴, они являются изотопно легкими. Обращает на себя внимание облегченный изотопный состав минеральных вод источников на р. Янейтывис и ранее исследованных на р. Пымвашор (Митюшева и др., 2012). Это отражает схожесть условий формирования трещинно-карстовых минеральных вод, приуроченных к карбонатным породам палеозоя.

Поскольку была установлена гидравлическая связь речных и подземных минеральных вод на данном участке, проводилось сопоставление их изотопных характеристик. Величины $\delta^{18}O$ в водах источников и рек отличаются не более 3 ‰, а δD — значительно. Речные воды Янейтывис более тяжелые по обоим изотопам: $\delta^{18}O$ –12.97 ‰ и δD –94.5 ‰. Для речных вод с преимущественным снеговым питанием можно было предположить близкий изотопный состав речных вод и снега. Но по данным В. С. Брезгунова и др. (1987), среднее значение $\delta^{18}O$ снежных осадков в районе г. Воркуты –18 ‰. К сожалению, нет данных по составу изотопов речных и озерных вод Большеземельской тундры. Были проведены наблюдения за изотопами кислорода и водорода снега и льда многолетних снежников Полярного Урала (Васильчук и др., 2018).

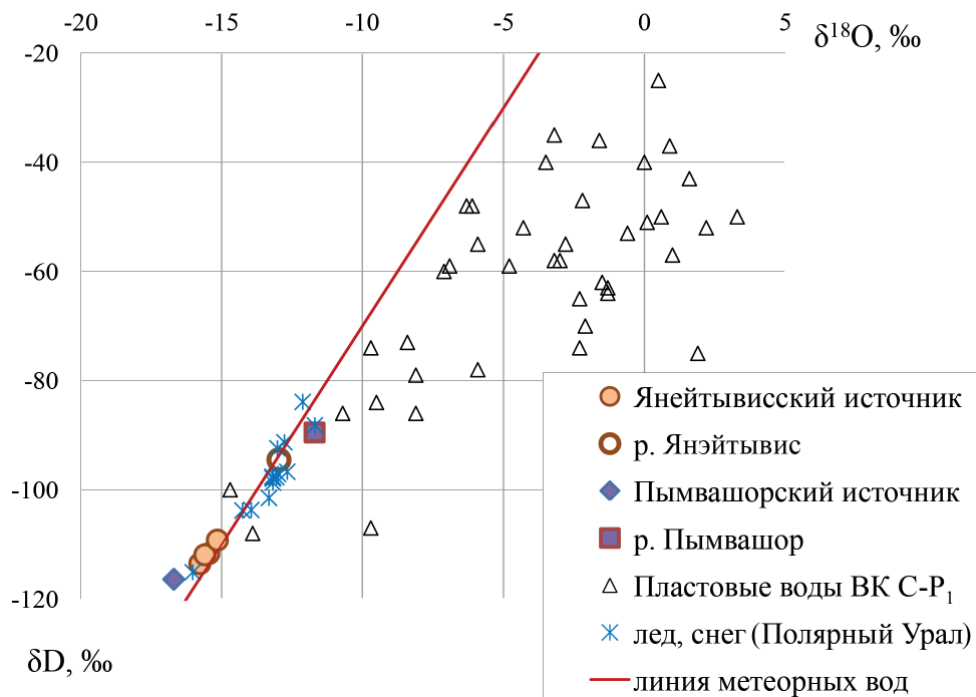


Рис. 3. Изотопный состав (δD , $\delta^{18}O$) вод минеральных источников и рек в районе Янейтывисского месторождения минеральных вод. Данные по пластовым водам каменноугольно-нижнепермского водоносного комплекса Печорской впадины приведены по Ю. Б. Селецкому и др.⁴ Изотопный состав снега и льда многолетних снежников Полярного Урала — по Ю. К. Васильчук и др. (2018)

Fig. 3. Isotopic composition (δD , $\delta^{18}O$) of waters of mineral springs and rivers in the area of the Yanejtyvis mineral water deposit. Data on formation waters of the Carboniferous-Lower Permian aquifer complex of the Pechora Depression are according to Yu. B. Seletsky et al.⁴ Isotopic composition of snow and ice of perennial snowfields of the Polar Urals according to Yu. K. Vasilchuk et al. (2018)

⁴ Использовать естественный изотопный состав глубоких подземных вод Тимано-Печорской провинции с целью изучения условий их формирования: Отчет / п. Зеленый, ВСЕГИНГЕО, 1990. Отв. исполн. Ю. Б. Селецкий, В. А. Поляков, В. В. Ачкасов. ГБУ РК «ТФИ РК», Сыктывкар. Инв. № 10922.

Use of natural isotopic composition of deep groundwater of the Timan-Pechora province in order to study the conditions of their formation. Report Territorial Geological Funds of the Komi Republic. Syktyvkar. P. Zeleny, VSEGINGEO, 1990. Exec. Yu. B. Seletskiy, V. A. Polyakov, V. V. Achakasov, No. 10922 (in Russian)

Таблица 3. Результаты определения содержания растворенных форм элементов в водных пробах методами ICP-OS и ICP-MS

Table 3. Results of determination of the content of dissolved forms of elements in water samples by ICP-OS and ICP-MS methods

Элемент Element	ПДК (СанПиН 1.2.3685-21, 2021) Maximum permissible concentration (SanPiN 1.2.3685-21, 2021)	Поверхностные воды / Surface waters					Показатели химической безопасности минеральных вод (ГОСТ..., 2020; Об утверждении..., 2022) Indicators of chemical safety of mineral waters (GOST., 2020; On approval..., 2022)	Подземные воды / Underground water									
		р. Воргашор Vorgashor river	р. Янэйтывис Yaneytyvis river		Озеро старичное Oxbow lake	Водоток из старичных озер Water flow from oxbow lakes		пресные fresh	минеральные источники / mineral springs								
			21-13	21-17					21-29	21-23	21-25	1-я группа 1st group			2-я группа 2nd group		3-я группа 3rd group
												21-14	21-15	21-16	21-19	21-20	
Na, мг/л	200	34	2	12.4	233	407	–	8.6	175	152	506	492	491	401			
Ca	–	25	16	23	100	187	–	38	111	98	259	234	230	190			
Mg	50	8.3	3.4	5.2	33	60	–	9.3	36	30	84	74	69	57			
Sr	7	0.26	0.07	0.16	2.06	4.03	25	0.20	1.65	1.28	5.08	5.01	4.84	4.02			
K	–	1.01	0.37	0.51	3.7	7.7	–	0.81	3.2	2.8	8.4	9.7	9.7	8.3			
Mn	0.1	0.0001	0.078	0.098	0.049	0.92	0.4	нпо	0.018	0.01	0.8	0.77	0.71	0.75			
Si	25	2.1	1.41	1.59	0.23	3.48	–	3.84	3.76	3.37	4.48	5.37	5.2	5.28			
Fe	0.3	0.05	0.55	0.59	0.14	0.024	–	нпо	следы traces	0.23	0.90	0.29	0.36	0.71			
Li,	0.03	0.056	0.016	0.0032	0.054	0.013	–	0.0044	0.085	0.063	0.12	0.19	0.16	0.12			
B	0.5	0.041	0.010	0.021	0.25	0.60	–	0.019	0.34	0.25	0.52	0.85	0.74	0.57			
Al, мкг/л	200	1.8	1.6	1.9	44.2	нпо	–	2.6	нпо	5.31	13.49	нпо	0	19.75			
P	–	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	–	9.4	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо			
Sc	–	0.67	0.37	0.51	нпо	нпо	–	1.3	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо			
Ti	100	0.35	0.25	0.30	нпо	нпо	–	0.70	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо			
V	100	0.32	0.22	0.25	11	14	–	0.66	27	23	12	19	12	13			
Cr	50	0.87	0.60	0.69	27	30	–	2.1	56	56	26	37	29	31			
Co	100	0.26	0.12	0.17	1.4	2.8	–	0.23	2.5	2.0	3.4	4.5	3.7	2.6			
Ni	20	1.2	0.93	0.99	4.6	8.6	20	0.55	6.4	4.2	7.0	11.0	7.9	6.9			
Cu	100	0.51	0.42	0.36	3.0	4.8	1000	0.10	3.7	3.1	5.0	7.3	5.9	4.8			
Zn	5000	0.24	0.41	нпо	нпо	нпо	–	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо			
As	10	0.45	0.42	0.56	нпо	нпо	50	0.35	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо			

Se	10	нпо	нпо	0.52	нпо	нпо	50	0.36	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Rb	–	0.56	0.42	0.49	2.8	7.0	–	0.33	4.5	3.3	5.0	11.0	9.1	6.5
Y	–	нпо	нпо	нпо	0.31	0.22	–	нпо	0.14	0.20	0.45	0.21	0.22	0.13
Zr	–	нпо	нпо	нпо	0.28	нпо	–	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Mo	70	0.20	0.14	0.16	0.19	0.88	–	0.66	1.8	1.5	0.57	1.4	0.72	0.79
Rh	–	нпо	нпо	нпо	нпо	0.62	–	нпо	нпо	нпо	0.61	0.93	0.77	0.60
Pd	–	0.77	0.17	0.45	9.0	25.0	–	0.50	18.0	13.0	25.0	37.0	30.0	23.0
Cs	–	нпо	нпо	нпо	0.28	0.39	–	нпо	0.48	0.72	0.25	0.50	0.33	0.42
Ba	700	9.0	1.8	3.6	47	72	5000	2.0	57	63	82	100	76	62
La	–	нпо	нпо	нпо	0.93	0.32	–	нпо	0.62	0.24	1.1	нпо	нпо	0.24
Ce	–	нпо	нпо	нпо	0.54	0.21	–	нпо	0.18	0.31	0.39	нпо	нпо	0.17
Pr	–	нпо	нпо	нпо	0.28	0.10	–	нпо	нпо	нпо	0.24	нпо	нпо	0.10
Eu	–	нпо	нпо	нпо	0.37	нпо	–	нпо	нпо	нпо	0.24	нпо	нпо	нпо
Er	–	нпо	нпо	нпо	0.42	нпо	–	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Tm	–	нпо	нпо	нпо	0.24	нпо	–	нпо	нпо	нпо	0.19	нпо	нпо	0.09
Lu	–	нпо	нпо	нпо	0.24	нпо	–	нпо	нпо	нпо	0.21	нпо	нпо	0.16
Pb	10	нпо	нпо	нпо	0.54	1.4	10	нпо	0.49	0.49	0.22	2.8	02.2	1.1
Th	–	нпо	нпо	нпо	0.61	0.14	–	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
U	–	0.18	нпо	0.10	0.09	0.42	–	0.62	1.40	1.07	0.86	0.21	0.36	0.39

Примечания: нпо – ниже предела обнаружения.

Жирным шрифтом выделены превышения элементов относительно предельно допустимых концентраций (ПДК) СанПиН 1.2.3685-21.

Notes: нпо – below the detection limit.

Elements exceeding the MPC of SanPiN 1.2.3685-21 are highlighted in bold.



Измеренные величины δD и $\delta^{18}O$ вод р. Янэйтывис входят в диапазон значений, полученных для льда и снега.

Для подтверждения или исключения роли вод оттаявших многолетнемерзлых пород в формировании вод минеральных источников, приведем имеющиеся данные для пласта льда, залегающего на глубине 28–32 м Бованенковской площади (Ямал) (Васильчук, 2020) со следующим изотопным профилем: $\delta^{18}O$ от -16.95 до -18.29 ‰, а δD от -131.7 до -146 ‰. Эти величины (на графике не приведены) находятся в области наиболее низких значений и, вероятно, незначительно отличаются от показателей для ММП исследованного нами региона. Полагаем, что полученный для минеральных вод источников на р. Янэйтывис легкий состав тяжелых

стабильных изотопов водорода и кислорода-18 отражает смешанный генезис вод. Наибольший вклад в формирование изотопного состава вод вносят, с одной стороны, поступления изотопно-облегченных компонентов вод современных осадков, сформированных в холодных климатических условиях, и вод от деградирующей в зонах таликов многолетнемерзлой толщи и, с другой стороны, в меньшей степени, морские (или смешанные) пластово-трещинные воды нижнекаменноугольных отложений.

Б. М. Зимаковым в 1959 г. при изучении геохимии газов осадочной толщи полярной части Урала было установлено, что Усть-Воргашорский (Янейтывисский) источник периодически газифицируется. Состав свободного

Таблица 4. Температурные характеристики вод источников

Table 4. Temperature characteristics of spring waters

№ пробы Sample No.	Измеренная температура, °C Measured temperature, °C	Расчетные значения пластовой температуры по гидрохимическим геотермометрам, °C Calculated formation temperature values according to hydrochemical geothermometers, °C			Расчетная глубина по геотермометрам, °m Calculated depth according to geothermometers, °m		
		Na-Li	SiO ₂	K-Mg	Na-Li	SiO ₂	K-Mg
21-16	3.5	18	46	34	645	1644	1197
21-19	5.6	27	53	32	947	1899	1155
21-20	5.2	19	54	32	667	1918	1131
21-27	3.4	19	53	33	674	1880	1181

Таблица 5. Физико-химическая характеристика исследованных поверхностных вод

Table 5. Physicochemical characteristics of the studied surface waters

Параметры Parameters	Источники поверхностных вод / Surface water sources			
	р. Воргашор Vorgashor river	р. Янэйтывис Yaneytyvis river		Водоток из старичных озер в р. Янэйтывис Water flow from oxbow lakes to the Yaneytyvis River
		Точки наблюдения / Observation points		
	21-13	21-17	21-29	21-25
pH	8.0	7.4	7.6	7.7
температура, °C temperature, °C	15.5	16.2	15.7	13.0
минерализация, мг/л mineralization, mg/l	426	124	187	2043
Na ⁺	34	3.8	14.9	430
NH ₄ ⁺	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
K ⁺	1.01	0.37	0.66	11.10
Ca ²⁺	49	20	28	230
Mg ²⁺	106	3.6	5.8	68
Cl ⁻	82	5.1	27	1046
SO ₄ ²⁻	20.4	2.7	7.9	235
HCO ₃ ⁻	134	88	103	23
NO ₃ ⁻	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03
H ₂ SiO ₃	6.29	3.98	0.69	11.07
CO ₂ расч	5.98	15.27	10.70	н. с.
Fe	0.49	0.55	0.59	0.024
жесткость общая, мг-экв/л total hardness, mol/l	11.17	1.29	1.87	17.07
состав вод water composition	Cl-HCO ₃ Mg	HCO ₃ Ca-Mg	HCO ₃ -Cl Ca-Na	Cl Na-Ca



газа азотный (N_2 — 94 %, O_2 — 5 %, CO_2 — 1 %) с гелиеносностью ($He + Ne = 0.12428$ %, $Ar + Kr = 1.305$ %) и низким содержанием углеводов (0.01 %). Основным отличием при сопоставлении с составом спонтанных газов сероводородных источников гряды Чернышева (Митюшева и др., 2012) является присутствие кислорода и меньшее количество гелия. Водорастворенные газы Усть-Воргашорского источника также имели азотный состав (%): N_2 — 93.6, O_2 — 1.2, CO_2 — 4.01, H_2 — 1.2, CH_4 — 0.1, нефтяные кислоты — 1.0 мг/л. Газовый состав минеральных вод, вскрытых скважинами, изученный при разведке Янейтывисского месторождения (Отчет по детальной..., 1978)³ также азотный (%): N_2 — 80–94, CO_2 — 2–3, O_2 — 5–6, H_2 — 0–0.2, CH_4 — до 4.4, Ar — 0.91–1.4.

Речная долина Янейтывис является зоной концентрированного подземного стока и разгрузки минеральных и пресных карстовых вод. Здесь на небольшом участке выходов исследованных источников и наличия сквозного талика под реками образовалась особая экосистема, отличающаяся от окружающей тундры. Наблюдаем преобразования в качественном составе поверхностных вод, связанные с особыми условиями питания. И поскольку подземные воды взаимосвязаны с поверхностными, в статье приводится их гидрохимическая характеристика (табл. 3, 5). Минерализация и химический состав вод р. Янейтывис на этом небольшом участке изменяется от 0.12 до 0.19 г/л. Характерный для вод арктической зоны гидрокарбонатный магниево-кальциевый состав (21–17) здесь становится HCO_3 -Cl Ca-Na (21–29). Концентрации элементов Mg, Sr, Li, Ba, B, Pd возросли за счет поступления подземных минеральных вод (стоков от источников и субкавальной разгрузки в русле) в 2–3 раза, а Na — шестикратно. Нетипичным является и гидрокарбонатно-хлоридный магниевый (Mg — 69, Ca — 19%-экв.) состав вод р. Воргашор (21–13) с минерализацией 0.43 г/л. Сопоставление состава микроэлементов (табл. 3) показало в речных водах наличие ряда веществ 1–3 класса опасности (As, Se, Zn), а также Sc и Ti, отсутствующих в минеральных водах источников. Полагаем, что их наличие обусловлено техногенным аэрозольным загрязнением, поступающим от разработок Воркутинских угольных шахт, ТЭС и других промышленных предприятий. Было установлено (Оберман и др., 2004), что горелые и углистые породы отвалов, угольный шлам в Воркутинском районе содержит выше ПДК As, Zn, Cu, Ni и на уровне и более ПДК Li, Sb, Cr, Mn и Co. По данным М. И. Василевич и др. (2018), в районе Воркутинской агломерации содержание в снеге взвешенных частиц достигает 35 мг/дм³ (в четыре раза превышает фоновое значение), больше фона выявлены поллютанты: Cu и Mn (в 3–10 раз), Ni, Pb, Cr, Co, Al (до 20 раз), Hg в 100 и более раз, Cd и V (в 1.5 и 2–8 раз, соответственно). При этом важно подчеркнуть, что речные воды в районе Янейтывисского ММПВ не удовлетворяют СанПиН 1.2.3685-21 только по содержанию железа. Повышенные концентрации железа в целом характерны для региона и обусловлены прежде всего природным фактором.

Особый состав имеют озеро и водоток (т. н. 21–25, 21–23) из группы озер правого борта р. Янейтывис. Воды слабосоленые, с минерализацией до 2.0 г/л, хлоридные кальциево-натриевого состава (хлоркальцие-

вого типа), очень жесткие. Старичные озера накапливают пресный поверхностный сток с водосборной площади, сложенной четвертичными отложениями, и стоки минеральных вод от многочисленных источников. Эти поверхностные воды обогащены практически тем же набором микроэлементов (табл. 3), что и минеральные воды. Важно подчеркнуть, что имеется ряд компонентов (Th, Zr, Er), не выявленных в пресных и минеральных подземных водах исследованного участка. Возможно, в озерах существуют благоприятные условия для аккумуляции элементов, поступающих из окружающей природной среды (почв, пород) или за счет антропогенного загрязнения пылеаэрозольными частицами. Как поверхностные водные объекты культурно-бытового водопользования озеро и водоток должны соответствовать СанПиН 1.2.3685-21, однако выявлены превышения относительно ПДК содержания марганца (4.9–9.2), лития (1.8–4.3), натрия (1.2–2.0), магния и бора (до 1.2).

Заключение

Исследованы воды минеральных источников на Янейтывисском месторождении подземных минеральных вод, разведанном в 70-е годы XX в., которое находится за Северным полярным кругом в Арктической зоне России. Опробованы три группы очень холодных/холодных подземных источников с минерализацией 2.3–3.0 г/л в долине р. Янейтывис, приуроченных к зоне Янейтывисского разлома гряды Чернова, и поверхностные воды данного района.

Напорные минеральные подземные воды субкриогенного нижнекаменноугольного водоносного комплекса, выведенные на поверхность, слабощелочные, маломинерализованные, хлоридные кальциево-натриевого состава, относятся к хлоркальциевому типу по В. А. Сулину. Проведенная оценка изменения химического состава вод во временном разрезе за более чем полувековой период (1959–2021 гг.) показала трансформацию: сульфатно-хлоридный анионный состав вод стал хлоридным при сохранении соотношения основных катионов (Na-Ca) и без изменения гидрохимического ClCa-типа.

Получены новые данные по микрокомпонентному составу вод. Впервые определен изотопный состав (δD , $\delta^{18}O$) минеральных вод Янейтывисского источника и речных вод. Все эти гидрохимические данные свидетельствуют о смешанном генезисе вод. Химический состав минеральных вод источников несет в себе черты восходящих глубинных высокоминерализованных седиментогенных пластово-трещинных вод каменноугольного (или более древнего) водоносного комплекса, разбавленных по мере подъема на поверхность по проницаемым зонам разрывных нарушений пресными водами зоны активного водообмена различного генезиса. Генезис этих пресных вод также неоднороден. Они представляют смесь инфильтрационных вод современных областей метеорного питания и оттаявших вод зон таликов многолетнемерзлых пород. Процессы взаимодействия в системе «вода – порода – газ», происходящие в водоносном комплексе, также оказали влияние на формирование химического состава вод и постседиментационные изменения водовмещающих карбонатных толщ.



Оценка пластовых условий формирования солевого состава минеральных вод источников по SiO_2 -геотермометру показала, что воды поступают с глубины более 1.6 км, где величина глубинной температуры составляет около 50 °С.

Благодаря выходам Янейтивисских источников на поверхность и наличию сквозного талика на данном участке тундры существует особая экогеосистема, в которой наблюдается преобразование в качественном составе поверхностных вод (речных и озерных). Установлен разнообразный состав этих вод: HCO_3 -Ca-Mg, HCO_3 -Cl Ca-Na, Cl Na-Ca и Cl- HCO_3 Mg. Некоторые поверхностные водные объекты не соответствуют требованиям СанПиН 1.2.3685-21. Выявлено загрязнение рядом микроэлементов как природного (за счет питания их минеральными водами), так и техногенного происхождения. Янейтивисские водопоявления находятся в 30 км от горнопромышленного центра Большеземельской тундры — г. Воркуты, в зоне поступления в природную среду пылеаэрозольных частиц.

Маломинерализованные сульфатно-хлоридные (хлоридные) кальциево-натриевые воды Янейтивисского ММПВ по новому ГОСТ Р 54316–2020 по назначению являются лечебно-столовыми и относятся к XXI группе. Наиболее близки к хилловскому гидрохимическому типу минеральных вод с минерализацией 2.0–5.0 г/л. В настоящее время Янейтивисское ММПВ с запасами 1020 м³/сут категории «С₂» находится в нераспределенном фонде недр. Для организации розлива лечебно-столовой минеральной воды «Янейтивисская», необходимо провести геологические исследования (дозведку) месторождения, включая работы, требующие немалых затрат: расконсервацию скважин, анализ вод на соответствие требованиям ГОСТ Р 54316–2020, получить новое бальнеологическое заключение о химическом составе минеральных вод.

Работа проводилась в рамках государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ГР № 122040600011-5).

Выражаем искреннюю благодарность Г. А. Игнатьеву, О. В. Кокшаровой, Н. В. Туленковой (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), сотрудникам экоаналитической лаборатории ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, В. Ю. Лаврушину (ГИН РАН) за помощь в организации и выполнении аналитических исследований. Признательны сотрудникам геологического отряда № 11 Е. В. Антроповой, А. Н. Калмыкову, Ю. А. Кокшаровой, А. М. Митюшеву, О. А. Молодцовой, И. Н. Размыслову за помощь в проведении экспедиционных работ и отборе проб.

Литература / References

- Брезгунов В. С., Есиков А. Д., Якимова Т. В. и др. Распределение среднегодовых концентраций кислорода-18 в осадках на европейской территории СССР // *Материалы метеорол. исследований*. 1987. № 12. С. 54–58.
- Brezgunov V. S., Yesikov A. D., Yakimova T. V. et al. Distribution of average annual oxygen-18 concentrations in precipitation in the European territory of the USSR. *Proc. meteorological studies*, 1987, No. 12, pp. 54–58. (in Russian)
- Василевич М. И., Василевич Р. С., Шамрикова Е. В. Поступление загрязняющих веществ с зимними атмосферными осадками на территорию Воркутинской агломерации // *Водные ресурсы*. 2018. Т. 45. Вып. № 3. С. 244–254.
- <https://doi.org/10.7868/S0321059618030033>
- Vasilevich M. I., Vasilevich R. S., Shamrikova E. V. Receipt of pollutants with winter precipitation into the territory of the Vorkuta agglomeration. *Water Resources*, 2018, V. 45, No. 3, pp. 244–254. (in Russian)
- Васильчук Ю. К. Некоторые очевидные свидетельства внутригрунтового генезиса пластовых льдов на севере Евразии // *Арктика и Антарктика*. 2020. № 1. С. 23–34. DOI: 10.7256/2453-8922.2020.1.32283
- Vasilchuk Yu. K. Some obvious evidence of intra-ground genesis of massive ice in the north of Eurasia. *Arctic and Antarctic*, 2020, No. 1, pp. 23–34. (in Russian) DOI: 10.7256/2453-8922.2020.1.32283
- Васильчук Ю. К., Чижова Ю. Н., Буданцева Н. А., Васильчук А. К., Облогов Г. Е. Изотопный состав снежников и ледников полярного Урала // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2018. № 1. С. 81–89.
- Vasilchuk Yu. K., Chizhova Yu. N., Budantseva N. A., Vasilchuk A. K., Oblogov G. E. Isotopic composition of snowfields and glaciers of the polar Urals. *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*, 2018, No. 1, pp. 81–89. (in Russian)
- Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / С. Р. Крайнов, Б. Н. Рыженко, В. М. Швец. М.: Наука, 2004. 677 с.
- Geochemistry of groundwater. Theoretical, applied and environmental aspects. S. R. Krainov, B. N. Ryzhenko, V. M. Shvets. Moscow: Nauka, 2004, 677 p. (in Russian)
- Гидрогеология СССР. Том XLII. Коми АССР и Ненецкий национальный округ Архангельской области РСФСР. М.: Недра, 1970. 288 с.
- Hydrogeology of the USSR. V. XLII. Komi ASSR and Nenets National District of the Arkhangelsk Region of the RSFSR. Moscow: Nedra, 1970, 288 p. (in Russian)
- ГОСТ Р 54316—2020. Воды минеральные природные питьевые. Общие технические условия. Национальный стандарт РФ (утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13.03.2020 г. № 133-ст). М.: Стандартиформ, 2020.
- GOST R 54316—2020. Natural drinking mineral waters. General specifications. National standard of the Russian Federation (approved and put into effect by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated March 13, 2020. № 133-st). Moscow: Standartinform, 2020. (in Russian)
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист Q–41 — Воркута. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.
- State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Ural Series. Sheet Q-41 — Vorkuta. Explanatory Note. Saint Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory, 2007, 541 p. + 4 incl. (in Russian)
- Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. На 1 января 2023 года. Выпуск 101. Подземные воды. Том II. Минеральные воды. М.: МПР РФ, 2023.
- State Balance of Mineral Reserves of the Russian Federation. As of January 1, 2023. Issue 101. Groundwater. V. II. Mineral Waters. Moscow: MPR RF, 2023. (in Russian)
- Завгорудько В. Н., Сидоренко С. В., Кортелев В. В., Завгорудько Т. И., Завгорудько Г. В. Колымская здравница «Талая»: К 80-летию // *Вопросы курортологии, физи-*



- отерапии и лечебной физической культуры, 2020. Т. 97(3). С. 94–98.
- Zavgorudko V. N., Sidorenko S. V., Kortelev V. V., Zavgorudko T. I., Zavgorudko G. V. Kolyma health resort «Talaya»: Celebrating the 80th anniversary. Issues of balneology, physiotherapy and therapeutic physical culture, 2020, V. 97(3), pp. 94–98. (in Russian)
- Лечебно-минеральные воды Тимано-Печорского территориально-производственного комплекса / Л. В. Мигунов, Ю. И. Зытнер, В. А. Дедеев, В. П. Якуцени. Сыктывкар, 1983. 40 с. (Научные рекомендации - народному хозяйству / Коми филиал АН СССР; Вып. 42).*
- Therapeutic mineral waters of the Timan-Pechora territorial production complex / L. V. Migunov, Yu. I. Zytner, V. A. Dedeev, V. P. Yakutseni. Syktyvkar, 1983, 40 p. (Scientific recommendations for the national economy. Komi Branch USSR AS, 42.) (in Russian)
- Митюшева Т. П. Ресурсы и перспективы использования лечебных минеральных вод арктической части Европейского Северо-Востока // Минерально-сырьевые ресурсы арктических территорий Республики Коми и Ненецкого автономного округа: Материалы научно-практ. совещ. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2016. С. 49–51.*
- Mityusheva T. P. Resources and Prospects for the Use of Medicinal Mineral Waters in the Arctic Part of the European North-East. Mineral Resources of the Arctic Territories of the Komi Republic and the Nenets Autonomous Okrug. Proc. of the Scientific and Practical Conference. Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2016, pp. 49–51. (in Russian)
- Митюшева Т. П., Лаврушин В. Ю., Поляк Б. Г. Изотопный состав вод минеральных источников северного Предуралья // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы всерос. конф. с участием иностр. ученых. Томск: Изд-во НТЛ, 2012. С. 332–336.*
- Mityusheva T. P., Lavrushin V. Yu., Polyak B. G. Isotopic Composition of Mineral Spring Waters in the Northern Cis-Urals. Geological Evolution of Water Interaction with Rocks: Proc. of the All-Russian Conf. with the Participation of Foreign Scientists. Tomsk, NTL Publishing House, 2012, pp. 332–336. (in Russian)
- Оберман Н. Г., Шеслер И. Г., Рубцов А. И. Экогеология Республики Коми и восточной части Ненецкого автономного округа. Сыктывкар: ПрологПлюс, 2004. 256 с.*
- Oberman N. G., Shesler I. G., Rubtsov A. I. Ecogeology of the Komi Republic and the eastern part of the Nenets Autonomous Okrug. Syktyvkar: PrologPlus, 2004, 256 p. (in Russian)
- Подземные воды Европейского Северо-Востока СССР / В. А. Дедеев, Ю. И. Зытнер, Н. Г. Оберман и др. Сыктывкар, 1989. 157 с.*
- Groundwater of the European North-East of the USSR. V. A. Dedeev, Yu. I. Zytner, N. G. Oberman et al., Syktyvkar, 1989, 157 p. (in Russian)
- Об утверждении классификации природных лечебных ресурсов, медицинских показаний и противопоказаний к их применению в лечебно-профилактических целях: Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 31.05.2021 № 557н. Зарегистрирован 29.09.2021 № 65177. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202109290027> (дата обращения: 20.06.2022 г.).*
- On approval of the classification of natural medicinal resources, medical indications and contraindications for their use for therapeutic and prophylactic purposes: Order of the Ministry of Health of the Russian Federation dated 31.05.2021 № 557n. Registered on 29.09.2021, № 65177.
- Среднегодовые температуры и количество осадков. Воркута // Архив фактической погоды. Гидрометцентр России. URL:<http://meteoinfo.ru/archive-pogoda> (дата обращения: 26.09.2024 г.)*
- Average annual temperatures and precipitation. Vorkuta Archive of actual weather. Hydrometeorological Center of Russia. <http://meteoinfo.ru>
- СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. № 2. URL:<http://ivo.garant.ru/#/document/400274954/paragraph/37879:0>. (дата обращения: 19.01.2023 г.).*
- SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of January 28, 2021, № 2.
- Тектоника Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции: (Объяснительная записка к «Структурно-тектонической карте Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции» масштаба 1:1000000) / В. А. Дедеев, В. В. Юдин, В. И. Богацкий, А. Н. Шарданов. Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар, 1989. 28 с.*
- Tectonics of the Timan-Pechora oil and gas province. (Explanatory note to the «Structural and tectonic map of the Timan-Pechora oil and gas province» at a scale of 1:1,000,000). V. A. Dedeev, V. V. Yudin, V. I. Bogatsky, A. N. Shardanov. Komi SC UB RAS, Syktyvkar, 1989, 28 p. (in Russian)
- Термы Чукотки / Б. Г. Поляк, В. Ю. Лаврушин, А. Л. Чешко, О. Е. Киквадзе М.: ГЕОС, 2022. 222 с. (Труды Геологического института, Вып. 631).*
- Thermal Waters of Chukotka. B. G. Polyak, V. Yu. Lavrushin, A. L. Cheshko, O. Ye. Kikvadze. Moscow: GEOS, 2022, 222 p. (Proceedings of the Geological Institute, V. 631). (in Russian)
- Craig H. Isotope variation in meteoric waters // Science, 1961. V. 133. P. 1702–1703.*
- Fouillac C., Michard, G. Sodium/lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs // Geothermics. 1981. V. 10. P. 55–70.*
- Fournier R. O. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems // Geothermics. 1977. V. 5. P. 41–50.*
- Giggenbach W. F. Geothermal solute equilibria // Geochimica Cosmochim. Acta 1988. V. 52. P. 2749–2765.*

Поступила в редакцию / Received 24.09.2024