

УДК 550.4+556.3.01

МАЛОВ Александр Иванович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий отделом наук о Земле Института экологических проблем Севера Уральского отделения РАН (г. Архангельск). Автор 180 научных публикаций, в т. ч. 6 монографий

ЗЫКОВ Сергей Борисович, научный сотрудник лаборатории экологической радиологии отдела наук о Земле Института экологических проблем Севера Уральского отделения РАН (г. Архангельск). Автор 60 научных публикаций

ГОНТАРЕВ Михаил Владимирович, магистрант кафедры географии и геоэкологии института естественных наук и биомедицины Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. Автор 4 научных публикаций

ПОРШНЕВ Александр Игоревич, аспирант Института экологических проблем Севера Уральского отделения РАН (г. Архангельск)

МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ АКТИВНОСТЕЙ ИЗОТОПОВ УРАНА В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ВЕНДА МЕЗЕНСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

Исследования выполнены с целью определения тенденций в изменении уран-изотопного состава подземных вод при их длительной эксплуатации и возможностей использования этой информации для прогноза качества подземных вод и решения поисковых задач. Методологической особенностью работы является определение времени нахождения подземных вод в водоносном горизонте по уран-изотопным данным. В результате для скважин, расположенных на фронте зоны пластового окисления песчано-глинистых отложений падунской свиты венда в пределах неоген-четвертичной Северо-Двинской впадины, установлено постоянное повышение активностей изотопов урана по сравнению с первоначальными. Это повышение связывается с гидрогенным перераспределением урана в условиях окислительной обстановки и осаждением его при смене окислительных условий на восстановительные. При этом, по расчетам, концентрации урана в осадочных отложениях могут превысить фоновые в 2-3 раза. Полученные закономерности могут использоваться при поисках гидрогенных рудопроявлений урана в палеодолинах осадочных бассейнов. Для скважин, связанных с вышележащими горизонтами, обычно наблюдается снижение активностей изотопов урана. Эта тенденция может использоваться при обосновании эксплуатации минеральных питьевых и лечебных вод. Наиболее благоприятны в радиологическом отношении подземные воды в отложениях мезенской свиты венда вследствие восстановительной для урана обстановки в области их формирования.

Ключевые слова: *изотопы урана, подземные воды, горные породы, изотопное датирование, Мезенская синеклиза.*

Введение. Исследование распределения изотопов урана в подземных водах важно для решения как экологических, так и экономических прикладных задач. Прежде всего нужно контролировать концентрации ^{238}U и активности изотопов урана в питьевых и минеральных водах. По рекомендациям ВОЗ [9] ориентировочное содержание U в питьевой воде не должно превышать 15 мкг/л ($\sim 0,19$ Бк/л); по канадским стандартам – 20 мкг/л; в США максимальный уровень определен в 30 мкг/л.

В России нормируется суммарная альфа-активность питьевых и минеральных вод, которая не должна превышать 0,2 Бк/л. Однако воду допускается использовать и при более высоких ее значениях. В этих случаях необходимо проводить полное исследование радиоизотопного состава подземных вод и выполнять расчет дозы облучения (E), получаемой при потреблении этой воды. Нормативное значение $E = 0,1$ мЗв/год. Для минеральных вод венда расчет приведен в работе «Изотопы урана в подземных водах венда Мезенской синеклизы. Водные ресурсы» [2].

Для экономики важна возможность использования распределения изотопов урана и других радиоактивных элементов в осадочных бассейнах при поисках гидрогенных месторождений урана и других полезных ископаемых, формирующихся на восстановительных барьерах.

Необходимо отметить и применимость радиоизотопов для решения фундаментальной научной проблемы, связанной с изучением механизмов, процессов, факторов, этапов геологической эволюции системы вода – порода, а также определения возраста подземных вод по уран-изотопным данным; количественной оценки факторов формирования радиоактивных вод, защищенности и уязвимости подземных вод; определения скоростей химического растворения пород, реконструкции геодинамических условий и климатических изменений.

В рамках настоящей работы дается оценка направленности изменений уран-изотопного состава подземных вод в процессе эксплуата-

ции с целью прогноза их качества и решения поисковых задач.

Методика исследований. Отбор проб подземных вод осуществлялся из самоизливающихся и эксплуатируемых погружными насосами скважин (*табл. 1*) в период 2003–2012 годов. Осаждение изотопов U из водных проб объемом 20 литров проводили на специально подготовленном активированном угле марки «БАУ-А». Определение изотопов урана в подземных водах выполнялось в соответствии с унифицированной методикой Всероссийского института минерального сырья (ВИМС) [5]. Методика предусматривает предварительную радиохимическую подготовку, которая включает перевод навески пробы в раствор; выделение определяемых изотопов, включая индикаторы; отделение от мешающих радионуклидов; приготовление электролитическим способом препарата (счетного образца). Электролитическое осаждение выполняли на подложку из коррозионно стойкой нержавеющей стали. Спектрометрическое детектирование альфа-частиц осуществляли с помощью альфа-спектрометра «Прогресс-альфа» с погрешностью 7–20 % в лаборатории экологической радиологии Института экологических проблем Севера Уральского отделения РАН (г. Архангельск). Определения pH, Eh производились непосредственно на самоизливающихся, реже – эксплуатируемых скважинах с использованием полевой экспресс-лаборатории. Минерализация подземных вод определялась путем суммирования компонентов их состава. В 2003–2011 годах исследования выполнялись в аккредитованных лабораториях г. Архангельска (ОАО «Архангельскгеолдобыча», Центр государственного санитарно-эпидемиологического надзора); в 2012 году – в лаборатории LMTG (Toulouse, France). Концентрации Ca, Mg, Na и K определяли с погрешностью 1-2 %, используя атомно-абсорбционный спектрометр (ААС) «Perkin-Elmer 5100 PC». Щелочность измерялась методом потенциометрического титрования соляной кислотой на автоматизированном титраторе «Metrohm 716 DMS Titrino»

с использованием Gran method с пределом обнаружения 10^{-5} М и неопределенностью 2 %. Растворенный органический углерод (DOC) анализировали с помощью «Carbon Total Analyzer» («Shimadzu TOC 5000») с погрешностью не более 3 %. Концентрации основных анионов (Cl, SO₄, F) были измерены методом ионной хроматографии (HPLC, «Dionex ICS 2000») с погрешностью 2 %. Микроэлементы определены без предварительного концентрирования на ICP-MS («Agilent 7500»).

Результаты и их обсуждение. Результаты аналитических исследований проб подземных вод приведены в *таблице*. Графики, отображающие эти результаты, представлены на *рис. 1*.

Скважины «Вожорма», «Беломорье-1» и «Мироново» с наиболее высокими активностями изотопов урана расположены на фронте зоны пластового окисления. Под фронтом зоны пластового окисления понимается граница между областями с окислительными и восстановительными для U⁶⁺ условиями. В этой области выделяется особый тип подземных вод с минерализацией порядка 5–10 г/л. На правом берегу реки Северной Двины, где водоносный комплекс терригенных отложений венда выходит непосредственно под карбонатно-терригенные отложения среднего карбона (C₂), эти воды имеют хлоридный натриевый, реже кальциево-натриевый состав. Там же,

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД СКВАЖИН В 2003–2012 годах

| Название скважины | Координаты | Водоносный горизонт | Интервал опробования, м | Год | pH | Eh, мв | ²³⁴ U/ ²³⁸ U | ²³⁸ U, Бк/дм ³ | ²³⁴ U, Бк/дм | М, г/л |
|-------------------|--|---------------------|-------------------------|------|-----|--------------|------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--------------|
| Вожорма | 64° 20' 09" с. ш. 41° 31' 17" в. д. | Vpd | 56–85 (самоизлив) | 2005 | 7,2 | +150 | 4,69 | 0,00116 | 0,00546 | 19170 |
| | | | | 2007 | 6,8 | +187 | 5,10 | 0,06080 | 0,31000 | 14100 |
| | | | | 2007 | 7,1 | +215 | 4,75 | 0,10280 | 0,48810 | 13500 |
| | | | | 2008 | 7,1 | +142 | 4,85 | 0,15410 | 0,74960 | Нет сведений |
| | | | | 2010 | 7 | +157 | 6,88 | 0,05893 | 0,40560 | Нет сведений |
| | | | | 2011 | 7,3 | +217 | 4,75 | 0,35500 | 1,68800 | 13370 |
| Беломорье-1 | 64° 17' 38" с. ш. 40° 53' 06" в. д. | Vpd | 80–120 | 2003 | 6,9 | +260 | 5 | 0,08382 | 0,41880 | 8672 |
| | | | | 2006 | 7 | +300 | 4,91 | 0,12540 | 0,61570 | Нет сведений |
| | | | | 2008 | 6,6 | +235 | 4,95 | 0,17660 | 0,87450 | Нет сведений |
| | | | | 2010 | 6,6 | +275 | 5,39 | 0,14920 | 0,80390 | Нет сведений |
| | | | | 2011 | 7,2 | +166 | 5,35 | 0,09470 | 0,55050 | Нет сведений |
| | | | | 2012 | 7,2 | Нет сведений | 5,46 | 0,18510 | 1,01100 | 8399 |

окончание табл.

| Название скважины | Координаты | Водоносный горизонт | Интервал опробования, м | Год | pH | Eh, мВ | ²³⁴ U/ ²³⁸ U | ²³⁸ U, Бк/дм ³ | ²³⁴ U, Бк/дм | М, г/л |
|-------------------|--|---------------------|-------------------------|------|--------------|--------------|------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--------------|
| Мироново | 64° 18' 20'' с. ш. 41° 23' 43'' в. д. | Vpd | 80–120 (самоизлив) | 2007 | 6,3 | +218 | 6,37 | 0,03183 | 0,20250 | 4800 |
| | | | | 2008 | 7,2 | +340 | 7,07 | 0,09489 | 0,67120 | Нет сведений |
| | | | | 2010 | 7,1 | +270 | 4,65 | 0,05426 | 0,25230 | Нет сведений |
| | | | | 2011 | 7,4 | Нет сведений | 3,48 | 0,01471 | 0,05125 | 5317 |
| Поморская | 65° 20' 31'' с. ш. 41° 05' 34'' в. д. | Vpd | 80–150 (самоизлив) | 2006 | Нет сведений | Нет сведений | 4,36 | 0,01454 | 0,06339 | 3000 |
| | | | | 2006 | 7,6 | +156 | 4,67 | 0,02350 | 0,10970 | 3100 |
| | | | | 2007 | 7,6 | +190 | 4,81 | 0,00935 | 0,04495 | 3060 |
| | | | | 2008 | 7,7 | +234 | 2,74 | 0,00452 | 0,01236 | 2300 |
| | | | | 2012 | Нет сведений | Нет сведений | 4,76 | 0,03350 | 0,15940 | 2523 |
| Беломорье-2 | 64° 17' 38'' с. ш. 40° 53' 06'' в. д. | Vmz | 200–300 | 2003 | 7 | +188 | 6,34 | 0,01036 | 0,06564 | 25220 |
| | | | | 2006 | 7,6 | +174 | 5,39 | 0,00598 | 0,03223 | 20800 |
| | | | | 2007 | 7,4 | +227 | 3,92 | 0,00876 | 0,03431 | 19950 |
| | | | | 2008 | 6,6 | +277 | 6,15 | 0,00703 | 0,04321 | 19165 |
| Лазурный-1 | 64° 30' 57'' с. ш. 40° 39' 06'' в. д. | Vmz | 80–120 (самоизлив) | 2005 | 8 | +50 | 1,92 | 0,00470 | 0,00904 | 9192 |
| | | | | 2006 | 8 | +64 | 7,13 | 0,00135 | 0,00961 | 9100 |
| | | | | 2007 | 8,3 | -42 | 15,92 | 0,00014 | 0,00230 | 9200 |
| | | | | 2008 | 8,2 | -10 | 4,98 | 0,00102 | 0,00508 | Нет сведений |
| | | | | 2010 | 8,2 | -10 | 2,72 | 0,00025 | 0,00068 | 9065 |

где водоносный комплекс перекрыт нижнекарбонowymi и верхнедевонскими загипсованными породами (C₁-D₃) (на левобережье реки), они имеют сульфатно-хлоридный натриевый и сульфатно-хлоридный кальциево-натриевый состав. Для них характерны

значения Eh +142 – +300 мВ, что свидетельствует о наличии окислительных условий в водоносном горизонте, т. е. уран должен находиться в растворе. Концентрации его в этом типе вод максимальны: в среднем 8,3 мкг/л. Вода поступала в водоносный го-

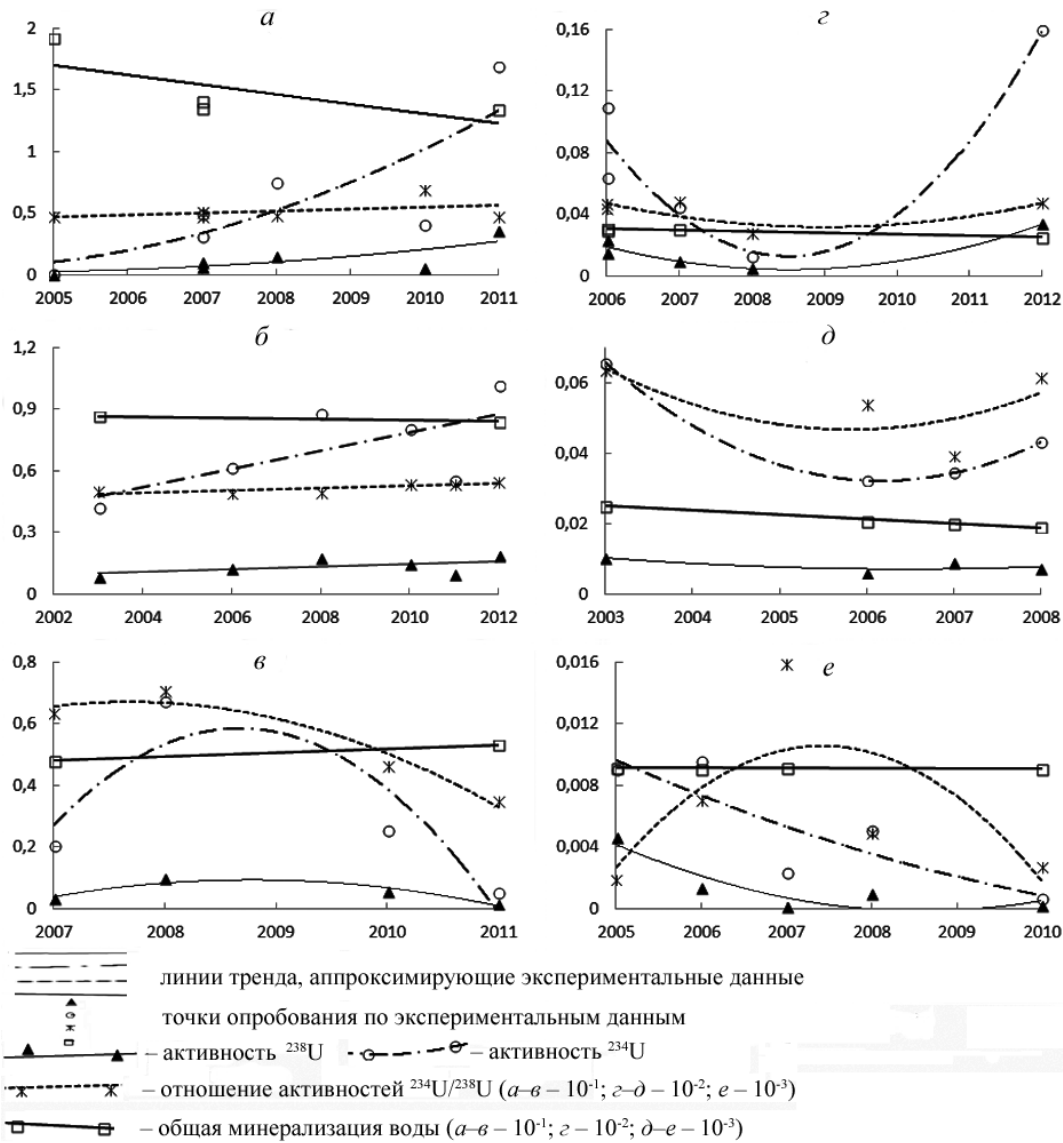


Рис. 1. Графики изменения активностей изотопов урана (^{234}U и ^{238}U) и их отношения (γ), а также общей минерализации подземных вод (М) за период 2003–2012 годы по скважинам: *a* – Вождорма, *б* – Беломорье-1, *в* – Мироново, *г* – Поморская, *д* – Беломорье-2, *е* – Лазурный-1 (на оси ординат расположены значения активностей изотопов урана (^{238}U и ^{234}U), (Бк/л), отношения активностей (^{234}U и ^{238}U), (безразмерная величина), минерализация подземных вод (г/л))

ризонт в процессе таяния московского ледника примерно 130 тыс. лет назад [3].

Однако на скважинах «Вождорма» и «Беломорье-1» наблюдается отчетливый рост значений активностей изотопов урана в течение 6–9 лет наблюдений за изотопным составом

подземных вод (рис. 1а, б). При этом на скважине «Вождорма» происходит снижение минерализации воды, на скважине «Беломорье» она практически не меняется. Очевидно, что в результате длительного самоизлива и эксплуатации к скважинам подтягиваются подземные

воды с более высокими активностями урана (по сравнению со средними). Так как минерализация этих вод примерно соответствует выделенному типу вод с возрастом 130 тыс. лет, можно полагать, что они имеют такой же возраст. В таком случае повышение активностей урана в них может быть связано только с его более высокими концентрациями в водовмещающих отложениях.

Оценим порядок их значений. Для этого используем формулу для определения времени пребывания подземных вод в водоносном горизонте (t) [3]:

$$t = \frac{\ln(k^{-1})}{\lambda_2}, \quad (1)$$

где $\lambda_2 = 2,8263 \cdot 10^{-6} \text{ лет}^{-1}$ [7] – константа распада ^{234}U ;

$$k = 1 - \frac{c_{1\text{вод}} \cdot (\gamma_{1\text{вод}} - 1)}{M_s \cdot c_{1\text{пород}} \cdot p}, \quad (2)$$

где $M_s = \rho_m \cdot (1 - n) / \rho_{\text{вод}} \cdot n$. (3)

Расчетная плотность минеральной части (ρ_m) и пористость (n) алевролитов определены как средние по 52 значениям: $\rho_m = 2,75 \text{ г/см}^3$; $n = 0,23$. $\rho_{\text{вод}}$ – плотность воды $\sim 1 \text{ г/см}^3$; $c_{1\text{вод}}$, $c_{1\text{пород}}$ – концентрации урана в воде и породе соответственно; $\gamma_{1\text{вод}}$ – отношение активностей $^{234}\text{U} / ^{238}\text{U}$ в воде; p – вероятность выхода ^{234}U в воду при распаде ^{238}U в породе:

$$p = \frac{0,235 \cdot S \cdot L}{1 - n}, \quad (4)$$

где S – площадь взаимодействия вода–порода в $\text{см}^2/\text{см}^3$ горной породы; L – длина пробега атома отдачи $^{234}\text{Th} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ см}$.

Расчетные значения концентраций U и отношений активностей ^{234}U и ^{238}U в горных породах приняты как средние по 22 определениям: $c_{1\text{пород}} = 3 \text{ мг/кг}$; $\gamma_{\text{пород}} = 1$.

Для определения площади взаимодействия вода–порода использованы данные о гранулометрическом составе отложений. При $S = 0,5 \text{ м}^2/\text{см}^3$ значение p по (4) составило 0,0045.

Пересчет активности ^{238}U в воде в концентрацию $c_{1\text{вод}}$ производился исходя из того, что «одному Бк соответствует $T_{1/2} / \ln 2$ атомов радионуклида, при этом $T_{1/2}$ (период полураспада) должно быть выражено в секундах» [1]. Для ^{238}U $T_{1/2} = 4,468 \cdot 10^9 \text{ лет} = 1,409 \cdot 10^{17} \text{ с}$. То есть 1 Бк ^{238}U соответствует $1,409 \cdot 10^{17} / 0,693 = 2,033 \cdot 10^{17}$ атомов ^{238}U . Так как 1 атомная единица массы 1 Дн = $1,661 \cdot 10^{-21} \text{ мг}$, то масса 1 атома ^{238}U составит $238 \cdot 1,661 \cdot 10^{-21} = 3,953 \cdot 10^{-19} \text{ мг}$. Следовательно, 1 Бк ^{238}U соответствует $2,033 \cdot 10^{17} \cdot 3,953 \cdot 10^{-19} = 8,036 \cdot 10^{-2} \text{ мг } ^{238}\text{U} = 80,36 \text{ мкг } ^{238}\text{U}$.

Расчеты по формуле (1) показывают, что для формирования замеренных в 2011–2012 годах активностей урана в подземных водах скважин «Вождорма» и «Беломорье-1» концентрации урана в водовмещающих отложениях должны составлять 8,4 и 5,2 мг/кг соответственно, т. е. быть в 2–3 раза выше средних.

На скважине «Мироново», напротив, наблюдается существенное снижение значений активностей изотопов урана. Кроме того, одновременно так же значительно происходит уменьшение отношения изотопов $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (рис. 1в). Такая картина характерна для ситуации, когда к скважине подтягивается более молодая вода. Расчеты по формуле (1) показывают, что для формирования замеренных в 2011 году активностей урана в подземных водах скважины «Мироново» возраст этой воды должен составлять 8,4 тыс. лет, т. е. она попала в водоносный горизонт уже после таяния валдайского ледника.

Наиболее сложная картина наблюдается по скважине «Поморская» (рис. 1г), где имеет место самоизлив подземных вод с 1983 года. Скважина расположена на берегу р. Золотицы. В 2006 году возраст излившейся воды составлял в среднем 15,5 тыс. лет, что характерно для данного района, где формирование подземных вод венда связано с процессом таяния валдайского ледника. По результатам исследований четвертичных отложений Архангельской области [6, 7], низовья Северной Двины покрывались валдайским ледником ~ 20 –17 тыс. лет

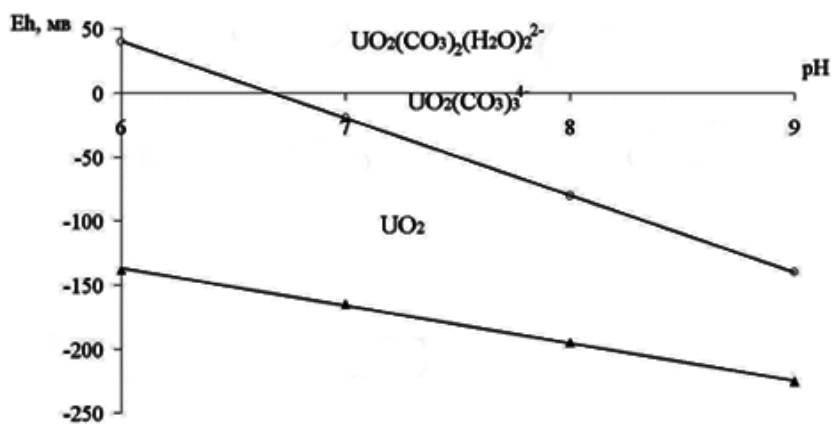


Рис. 2. Интервал Eh–pH осадения оксидов урана из подземных вод

назад. После этого ледниковый покров отступил к западу, а на рассматриваемой территории возник приледниковый водный бассейн, давший начало подземным водам, повысившим минерализацию до 1–5 г/дм³ и обогатившим химический состав за счет взаимодействия с ионно-солевым комплексом морских отложений микулинского межледниковья (Na⁺, Cl⁻), гидролиза алюмосиликатов (Na⁺, HCO₃⁻), растворения карбонатов (Ca²⁺, Mg²⁺) и гипсов (SO₄²⁻) [3].

Однако к 2008 году возраст изливаемой воды снизился до 2 тыс. лет за счет попадания более молодых вод из верхних частей разреза, о чем свидетельствует резкое уменьшение значения отношения активностей изотопов ²³⁴U/²³⁸U (с 4,7 до 2,7) и некоторое снижение минерализации подземных вод (см. таблицу). К 2012 году он уже повысился до 30 тыс. лет (рис. 1з) за счет подтягивания более древних вод, по-видимому, законсервированных под палеодолиной р. Золотицы.

В скважине «Лазурный-1» самоизливается подземная вода с низкими значениями Eh (см. таблицу). Они близки к значениям, характеризующим интервал осадения урана из подземных вод (рис. 2). Поэтому в воде наблюдаются ультранизкие активности изотопов урана. При таких условиях оценка возраста подземных вод не корректна [4]. Сходная ситуация

имеет место и на скважине «Беломорье-1», эксплуатирующей водоносный комплекс отложений мезенской свиты венда, залегающий на большой глубине. Сравнительно высокие значения Eh по этой скважине могут быть объяснены особенностями извлечения воды насосным оборудованием, когда она контактирует в скважине с атмосферным воздухом. По обеим скважинам наблюдается некоторое снижение активностей изотопов урана и большой разброс их отношений, что обычно имеет место при ультранизких концентрациях.

Заключение. В ходе выполненных исследований установлено, что в результате длительного самоизлива и эксплуатации к скважинам «Вождорма» и «Беломорье-1» подтягиваются подземные воды с более высокими активностями изотопов урана по сравнению с первоначальными. Повышение активностей может быть связано с осадением этого элемента на фронте зоны пластового окисления отложений венда в пределах неоген-четвертичной Северо-Двинской впадины. По расчетам, они в 2-3 раза превышают фоновые. Это может использоваться при поисках гидrogenных рудопроявлений урана. В результате подтока к скважине «Мироново» более молодых вод с возрастом порядка 8 тыс. лет, поступавших в водоносный горизонт после таяния валдайского ледника, эта скважина может использо-

ваться для добычи минеральных вод, соответствующих условиям как по величине общей минерализации, так и по значениям активностей изотопов урана. Целесообразно провести исследование комплекса радиоизотопов для оценки безопасности подземных вод, излива-

ющихся из скважины «Поморская». Лечебные воды скважин «Беломорье-2» и «Лазурный-1» наиболее стабильно благоприятны в радиологическом отношении вследствие восстановительной для урана обстановки в области их формирования.

Список литературы

1. Вредные химические вещества. Радиоактивные вещества: справоч. изд. / В.А. Баженов, Л.А. Булдаков, И.Я. Василенко и др.; под ред. В.А. Филова, Б.А. Ивина, Л.А. Ильина. Л., 1990. 464 с.
2. Изотопы урана в подземных водах венда Мезенской синеклизы / А.И. Малов, Г.П. Киселёв, Г.П. Рудик, С.Б. Зыков // Вод. ресурсы. 2009. Т. 36, № 6. С. 711–721.
3. Малов А.И. Использование геологических реперов для оценки времени нахождения подземных вод в водоносном горизонте по уран-изотопным данным на примере Северо-Двинской впадины // Литология и полезные ископаемые. 2013. Т. 48, № 3. С. 274–285.
4. Малов А.И. Использование четных изотопов урана в качестве гидрогеологических индикаторов // Вод. ресурсы. 2012. Т. 39, № 4. С. 419–424.
5. Методика выполнения измерений объемной активности изотопов урана (234, 238) в пробах природных вод альфа-спектрометрическим методом с радиохимическим выделением: инструкция № 38-ЯФ. М., 1999.
6. Система Белого моря / под ред. А.П. Лисицына. Т. I. Природная среда водосбора Белого моря. М., 2010. 480 с.
7. Age and Extent of the Scandinavian Ice Sheet in Northwest Russia / E. Larsen, A. Lyså, I. Demidov et al. // *Boreas*. 1999. Vol. 28, № 1. P. 115–132.
8. The Half-Lives of Uranium-234 and Thorium-230 / H. Cheng, R.L. Edwards, J. Hoff et al. // *Chemical Geology*. 2000. Vol. 169. P. 17–33.
9. WHO: *Guidelines for Drinking-Water Quality*: 3rd Edition. Geneva, 2004.

References

1. Bazhenov V.A., Buldakov L.A., Vasilenko I.Ya., et al. *Vrednye khimicheskie veshchestva. Radioaktivnye veshchestva* [Harmful Chemicals. Radioactive Substances]. Leningrad, 1990. 464 p.
2. Malov A.I., Kiselev G.P., Rudik G.P., Zikov S.B. Uranium Isotopes in Groundwater of the Mezen Syncline. *Water Resources*, 2009, vol. 36, no. 6, pp. 689–698.
3. Malov A.I. Ispol'zovanie geologicheskikh reперov dlya otsenki vremeni nakhozheniya podzemnykh vod v vodonosnom gorizonte po uran-izotopnym dannym na primere Severo-Dvinskoy vpadiny [Application of Geological Benchmarks for Determining Groundwater Residence Time in the Aquifer Based on Uranium Isotope Data: Evidence from the Severnaya Dvina Basin]. *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 2013, vol. 48, no. 3, pp. 274–285.
4. Malov A.I. Ispol'zovanie chetnykh izotopov urana v kachestve gidrogeologicheskikh indikatorov [The Use of Even Uranium Isotopes as Hydrogeological Tracers]. *Vodnye resursy*, 2012, vol. 39, no. 4, pp. 419–424.
5. *Metodika vypolneniya izmereniy ob'emykh aktivnosti izotopov urana (234, 238) v probakh prirodnykh vod al'fa-spektricheskimi metodami s radiokhimicheskim vydeleniem: instruktsiya № 38-YaF* [Methods for Measuring the Volumetric Activity of Uranium Isotopes (234, 238) in Natural Water Samples Using Alpha-Particle Spectroscopy with Radiochemical Separation]. Moscow, 1999.
6. *Sistema Belogo morya T. I. Prirodnaya sreda vodosbora Belogo morya* [The White Sea System. Vol. 1. The Natural Environment of the White Sea Basin]. Ed. by Lisitsyn A.P. Moscow, 2010. 480 p.
7. Larsen E., Lyså A., Demidov I., et al. Age and Extent of the Scandinavian Ice Sheet in Northwest Russia. *Boreas*, 1999, vol. 28, no. 1, pp. 115–132.
8. Cheng H., Edwards R.L., Hoff J., et al. The Half-Lives of Uranium-234 and Thorium-230. *Chemical Geology*, 2000, vol. 169, pp. 17–33.
9. WHO: *Guidelines for Drinking-Water Quality*. 3rd ed. Geneva, 2004.

Malov Aleksandr Ivanovich

Institute of Ecological Problems of the North,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russia)

Gontarev Mikhail Vladimirovich

Institute of Natural Sciences and Biomedicine,
Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (Arkhangelsk, Russia)

Zykov Sergey Borisovich

Institute of Ecological Problems of the North,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russia)

Porshnev Aleksandr Igorevich

Institute of Ecological Problems of the North,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russia)

LONG-TERM CHANGES IN URANIUM ISOTOPES ACTIVITY IN THE VENDIAN GROUNDWATER OF THE MEZEN SYNECLISE

The studies aimed to determine the trends in the uranium isotopic composition of groundwater at its long-term exploitation and the possibilities of using this information to predict groundwater quality and to search for mineral resources. The paper determined the groundwater residence time in the aquifer based on uranium isotope data. As a result, we have found that boreholes located at the front of the stratal oxidation zone of sandstones of the Vendian-period Padun suite (within the Neogene-Quaternary Northern Dvina depression) had continuous increase in the activity of uranium isotopes as compared to the original ones. This increase is associated with redistribution of hydrogenic uranium in oxidizing conditions and with its precipitation, when these conditions change into the reducing ones. At the same time, according to the calculations, the concentration of uranium in sediments may exceed the background ones by the factor of 2 or 3. The resulting patterns can be used in searching for hydrogenic uranium ore occurrences in palaeovalleys of sedimentary basins. Wells associated with overlying horizons usually have decreased activity of uranium isotopes. This trend can be used in justifying the exploitation of mineral and drinking water. The best groundwater, in terms of radiology, is found in the sediments of the Vendian-period Mezen suite, due to reducing conditions for uranium in this formation.

Keywords: *uranium isotopes, groundwater, rock, isotope dating, Mezen syncline.*

Контактная информация:

Малов Александр Иванович

адрес: 163061, г. Архангельск, Наб. Северной Двины, д. 23;

e-mail: malovai@yandex.ru

Гонтарев Михаил Владимирович

адрес: 163061, г. Архангельск, Наб. Северной Двины, д. 17;

e-mail: MKL9879@yandex.ru

Зыков Сергей Борисович

адрес: 163061, г. Архангельск, Наб. Северной Двины, д. 23;

e-mail: chatlanen-1@yandex.ru

Поршнева Александр Игоревич

адрес: 163000, Россия, г. Архангельск, ул. Карла Маркса, д. 15;

e-mail: nau912@yandex.ru

Рецензент – Губайдуллин М.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор, заместитель директора по научной работе института нефти и газа Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова