

Роль оледенений и морских трансгрессий в эволюции подземной гидросферы прибрежной арктической территории (на примере Юго-Восточного Беломорья)

А.И.МАЛОВ (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П.Лаверова Уральского отделения Российской академии наук (ФГБУН ФИЦКИА УрОРАН); 163061, г. Архангельск, набережная Северной Двины, 23)

Выполнена реконструкция геохимических процессов и климатических изменений в плейстоцен-голоцене по изменениям изотопно-химического состава подземных вод за последние 400 тыс. лет на восточном склоне Балтийского щита. Дана оценка степени участия талых ледниковых, морских и метеорных вод и рассолов в формировании подземных вод. Установлено, что в результате таяния ледниковых покровов 400–130 тыс. лет назад пресные воды проникли в осадочный чехол Мезенской синеклизы на глубину до 600 м. Трансгрессия моря 130–115 тыс. лет назад привела к засолению подземных вод в верхней части осадочного чехла. Последующее таяние ледника 13–12 тыс. лет назад и инфильтрация атмосферных осадков в последние 12 тыс. лет привели к формированию пресных вод до глубин 100–200 м.

Ключевые слова: подземные воды, стабильные изотопы, ледниковые талые воды, морская вода, смешение, датирование.

Малов Александр Иванович
доктор геолого-минералогических наук



malovai@yandex.ru

The role of glaciations and marine transgressions in the evolution of the underground hydrosphere of the coastal Arctic territory

A.I.MALOV (Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of RAS)

Geochemical processes and climatic changes in the Pleistocene-Holocene were reconstructed from changes in the isotope-chemical composition of groundwater on the eastern slope of the Baltic Shield over the past 400,000 years. The contributions of melt glacier, sea and meteoric waters and brines in groundwater formation is estimated. It was established that fresh water penetrated the sedimentary cover of the Mezen syncline to a depth of 600 m as a result of the ice sheets melting 400–130 ka. The sea transgression (130–115 ka) led to groundwater salinization in the upper part of the sedimentary cover. The subsequent glacier melting (13–12 ka) and precipitate infiltration in the past 12 ka led to fresh water formation to depths of 100–200 m.

Key words: groundwater, stable isotopes, glacial meltwater, seawater, mixing, dating.

Крупномасштабные климатические и географические изменения на Земле происходили регулярно. Часто они имели катастрофические последствия для земных обитателей. В настоящее время перспектива возможного глобального потепления также вызывает беспокойство. Поэтому климатические и географические палеореконструкции активно разрабатываются исследователями различных научных направлений. Гидрогеологи также не остаются в стороне. Их особенно интересуют крупномасштабные изменения в плейстоцене и голоцене на прибрежных

арктических и субарктических территориях. Здесь наиболее активно проявился эффект многократного чередования континентальных оледенений и морских трансгрессий с амплитудой колебаний уровня воды в море до 130 метров, что привело к большому разнообразию химического состава подземных вод и пространственному распределению данных изменений. Это следует учитывать в отношении политики управления и регулирования водными ресурсами. Например, оценки глубины проникновения талой воды ледника очень важны для окончательного проек-

тирования хранилищ радиоактивных отходов и их безопасности после закрытия. Не менее важна оценка возможности стабильного снабжения качественной питьевой водой крупных городов. С экологической точки зрения представляет интерес количественный прогноз опасности сброса солёных дренажных вод и рассолов из эксплуатируемых месторождений полезных ископаемых в поверхностные водотоки.

Использование стабильных изотопов обеспечивает существенную поддержку в палеогидрогеологических реконструкциях. Стабильные изотопы интенсивно изучались в осадочном Балтийском артезианском бассейне (БАБ), расположенном к югу от Балтийского щита (БЩ). Особенно пристальный интерес проявлялся к оценке степени участия талых ледниковых вод в процессах формирования изотопно-химического состава подземных вод и рассолов во время повторяющихся четвертичных оледенений [8, 14, 16, 19, 22]. Тремя компонентами смешения были талые воды ледников, метеорные воды и рассолы. Показано, что доля ледниковых вод в составе подземных достигала 38%, а доля рассолов – 98%. По результатам C-14 и Kг-81 датирования, предполагается, что процессы смешения рассолов с талыми водами ледников фиксируются в диапазоне от 12 тыс. до 1,3 и более млн. лет [8, 16].

В осадочном Северо-Двинском артезианском бассейне, расположенном восточнее БЩ, в Мезенской синеклизе, стабильные изотопы наименее исследованы. В 2006 г. И.В.Токаревым были отобраны 17 проб воды на Бобровском участке месторождения йодных вод и на прилегающих площадях с целью реконструкции условий формирования этого месторождения. В результате было подтверждено, что йодные воды происходят от внутреннего моря микунлинского межледниковья, однако их изотопный состав, по-видимому, изменялся в период оледенения и последующего разбавления региональным потоком пресных вод [3]. Вместе с тем гидрогеологические условия и эволюция химического состава подземных вод на качественной основе изучены достаточно детально [4, 5]. Поэтому целью данного исследования были количественная оценка степени участия талых ледниковых, метеорных и морских вод и рассолов в процессах формирования состава подземных вод по изотопно-геохимическим данным и использование стабильных изотопов для уточнения ранее выполненного датирования различных типов подземных вод [10].

Материал и методы. Пробы подземных вод были отобраны в районе юго-восточного побережья Белого моря, на водосборной площади р. Северная Двина

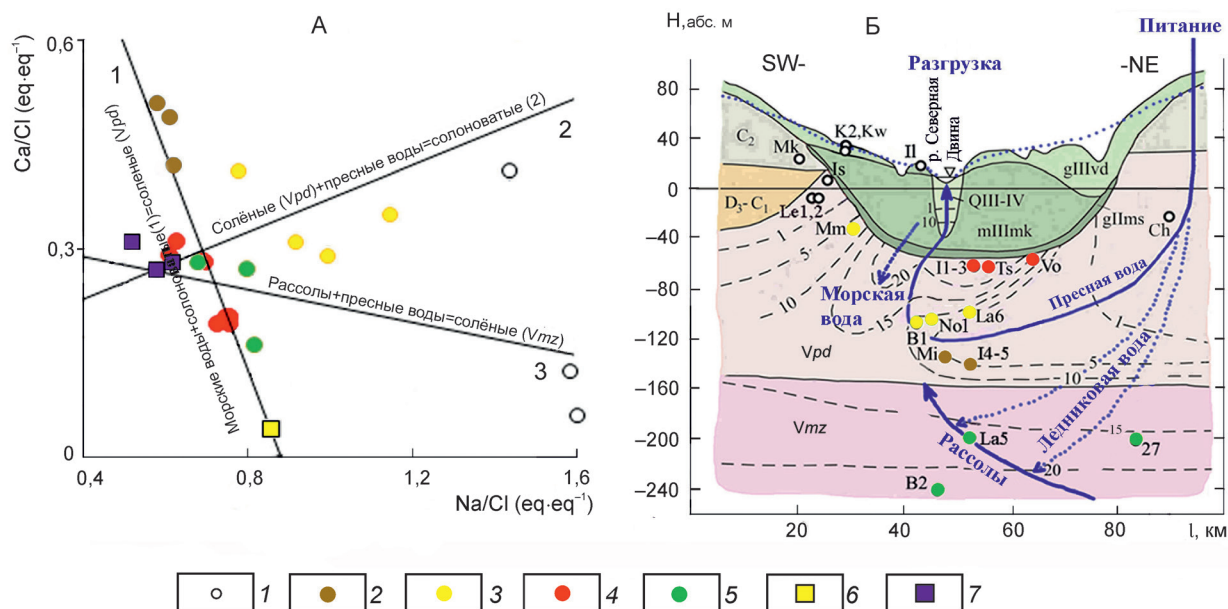


Рис. 1. Схемы смешения подземных вод:

А – смешение: I – морской воды с «солёноватыми1» водами с образованием «солёных Vpd», II – «солёных Vpd» с пресными водами с образованием «солёноватых2», III – смешение рассолов с талыми ледниковыми водами с образованием «солёных Vmz»; Б – концептуальная модель смешения основных потоков подземных вод и рассолов; воды: 1 – пресные, 2 – солёноватые (1), 3 – солёноватые (2), 4 – солёные (Vpd), 5 – солёные (Vmz), 6 – морские; 7 – рассолы

1. Главные компоненты химического и изотопного составов и возраст подземных вод

Проба	Год опробования	СГ (мг/л)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$	$^{14}\text{C}^a$ (pmc)	$\delta^{13}\text{C}^a$ (‰)	$^{14}\text{C}^a$ возраст (calBP, тыс. лет)	^{234}U - $^{238}\text{U}^a$ возраст (тыс. лет)
Пресные воды в трубках взрыва (М 320–596 мг/л)								
Ае	2013	19,2	-13,0	-95	Н.о.	Н.о.	Н.о.	6,5±1,0
Ас	2013	117	-13,0	-94	Н.о.	Н.о.	Н.о.	5,5±0,8
Пресные воды в отложениях падуновской свиты венда (М 23–939 мг/л)								
Вг	2013	19,3	-14,4	-105	Н.о.	Н.о.	Н.о.	2,5±0,4
28	2013	5,44	-13,8	-101	Н.о.	Н.о.	Н.о.	2,2±0,3
Le	2014	2,26	-13,8	-101	51,67±0,63	-11,5	Современные	0,27±0,04
28	2014	3,25	-14,1	-102	58,40±0,89	-11,0	Современные	2,4±0,4
26	2013	28,5	-13,7	-98	Н.о.	Н.о.	Н.о.	2,9±0,4
26	2013	34,4	-13,2	-97	Н.о.	Н.о.	Н.о.	2,7±0,4
36	2013	27,5	-13,8	-99	Н.о.	Н.о.	Н.о.	3,4±0,2
36	2014	19,1	-13,3	-97	25,01±0,47	-11,7	5,84±0,36	4,5±0,7
10	2013	51,7	-14,3	-103	Н.о.	Н.о.	Н.о.	11,7±1,6
22	2014	41,6	-13,6	-98	24,86±0,43	-10,1	4,65±0,39	2,4±0,4
10	2013	48,3	-13,8	-101	Н.о.	Н.о.	Н.о.	9,1±1,2
22	2013	72,7	-13,6	-98	Н.о.	Н.о.	Н.о.	3,4±0,5
Is	2013	106	-13,5	-99	Н.о.	Н.о.	Н.о.	NC
4	2013	129	-14,1	-102	Н.о.	Н.о.	Н.о.	10,2±1,4
21	2013	172	-14,0	-101	Н.о.	Н.о.	Н.о.	5,7±0,8
4	2013	150	-13,4	-98	Н.о.	Н.о.	Н.о.	11,8±1,6
21	2014	174	-13,5	-98	Н.о.	Н.о.	Н.о.	5,2±0,8
6	2014	190	-13,7	-100	25,3±0,64	-9,6	4,02±0,28	5,7±0,9
Lo	2014	201	-13,9	-100	37,03±0,67	-11,2	1,39±0,3	5,2±0,8
16	2013	272	-13,8	-101	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0,56±0,1
Слабосоленоватые воды в четвертичных отложениях (М 3239–3930 мг/л)								
Kw	2012	935	-13,4	-96	24,03±0,23	-17,4	7,53±0,18	Н.о.
K2	2012	1331	-14,0	-102	14,68±0,24	-19,8	16,2±0,26	Н.о.
Слабосоленоватые воды, опробованные на Приполярном Урале (Malovetal., 2015) (М 1836–2057 мг/л)								
tI-1	2011	960	-15,4	-114	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
tI-2	2011	967	-15,5	-114	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
tI-3	2011	980	-15,3	-113	19,29±0,37	-10,7	7,33±0,31	Н.о.
tII-1	2011	956	-15,3	-113	18,97±0,9	-9,8	6,78±0,78	Н.о.
tII-2	2011	969	-15,5	-114	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
tII-3	2011	897	-15,5	-114	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
tII-4	2011	881	-15,8	-115	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
tIII-1	2011	874	-15,8	-114	16±1,52	-9,6	8,03±1,71	Н.о.

Проба	Год опробования	СГ (мг/л)	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta^2\text{H}$	$^{14}\text{C}^a(\text{pmc})$	$\delta^{13}\text{C}^a(\text{‰})$	$^{14}\text{C}^a$ возраст (calBP, тыс. лет)	$^{234}\text{U}\text{-}^{238}\text{U}^a$ возраст (тыс. лет)
Слабосоленоватые воды в отложениях падунской свиты венда («солончатые1») (M 4968–6011 мг/л)								
I5	2006	2294	-14,2	-110	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
I4	2006	2486	-14,9	-114	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Mi	2014	2607	-13,6	-101	1,7±0,26	-14,6	32,96±2,3	26,2±3,9
Mi	2016	2594	-13,8	-102	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Солончатые воды в отложениях падунской свиты венда («солончатые2») (M 2523–10088 мг/л)								
14h	2012	1009	-12,5	-92	Н.о.	Н.о.	Н.о.	3,5±0,7
Mm	2013	2234	-12,9	-96	Н.о.	Н.о.	Н.о.	39,2±6,3
B1	2012	3034	-11,9	-89	5,78±0,24	-16,6	27,28±0,63	25,1±0,7 ^b
B1	2016	3047	-11,9	-89	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
La6	2012	3524	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
No1	2014	4057	-12,6	-97	0	Н.о.	Н.о.	Н.о.
No1	2016	3989	-13,2	-102	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Сильно солончатые и солёные воды в отложениях падунской свиты венда («солёные Vpd») (M 12725–27552 мг/л)								
Vo ₂₀₁₃	2013	7327	-9,3	-72	Н.о.	Н.о.	Н.о.	130 ^e
Vo ₂₀₀₆	2006	19170	-10,1	-69	Н.о.	Н.о.	Н.о.	130 ^e
I3	2006	21012	-7,1	-59	Н.о.	Н.о.	Н.о.	130 ^e
I3	2006	21080	-7,9	-64	Н.о.	Н.о.	Н.о.	130 ^e
I2	2006	21288	-9,4	-66	Н.о.	Н.о.	Н.о.	130 ^e
I1	2006	26781	-5,7	-48	Н.о.	Н.о.	Н.о.	130 ^e
I1	2006	27136	-5,7	-44	Н.о.	Н.о.	Н.о.	130 ^e
I1	2006	27180	-5,2	-38	Н.о.	Н.о.	Н.о.	130 ^e
Ts	2006	27552	-8,7	-65	Н.о.	Н.о.	Н.о.	130 ^e
Сильно солончатые и солёные воды в отложениях мезенской свиты венда («солёные Vmz») (M 15640–27482 мг/л)								
8mz	2014	7857	Н.о.	Н.о.	0	Н.о.	Н.о.	307±115 ^d
27	2013	8497	-13,4	-102	Н.о.	Н.о.	Н.о.	74±74 ^d
La5	2013	8551	-12,3	-96	Н.о.	Н.о.	Н.о.	65±65 ^d
B2	2014	15147	-11,3	-89	0	Н.о.	Н.о.	Н.о.
B2	2016	15016	-11,7	-90,4	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Рассолы усть-пинежской свиты венда (M 50117–168345 мг/л)								
Se	1984	31230	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
No2	1983	45020	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
B3	1983	42710	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Nen	1947	68480	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
UP	1955	93800	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Lom	1984	102300	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.

Проба	Год опробования	СГ (мг/л)	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta^2\text{H}$	$^{14}\text{C}^a$ (рмс)	$\delta^{13}\text{C}^a$ (‰)	$^{14}\text{C}^a$ возраст (calBP, тыс. лет)	$^{234}\text{U}\text{-}^{238}\text{U}^a$ возраст (тыс. лет)
Подземные воды и рассолы из водоносной системы кембрия–венда БАБ (Gerber et al., 2017) (M 5127–143 765 мг/л)								
1ВAB	2012	11109	–12,63	–92,8	5,1±0,5	Н.о.	Н.о.	541±28 ^с
2ВAB	2012	3087	–13,61	–100,7	2,8±0,1	Н.о.	Н.о.	407±27 ^с
3ВAB	2012	64632	–4,79	–42,7	Н.о.	Н.о.	Н.о.	821±89 ^с
4ВAB	2012	63996	–4,44	–40,6	11,8±0,4	Н.о.	Н.о.	>1227 ^с
5ВAB	2012	25531	–7,23	–55,2	Н.о.	Н.о.	Н.о.	293±21 ^с
6ВAB	2012	89664	–5,03	–37,2	Н.о.	Н.о.	Н.о.	>1174 ^с
7ВAB	2012	53907	–4,46	–34,7	Н.о.	Н.о.	Н.о.	1067±195 ^с

Примечание. Н.о. – не определялось; М – общая минерализация подземных вод и рассолов; а – по [10]; б – скорректированное значение возраста метеорных вод, с исключением примеси морских вод; с – возраст седиментационных вод микулинского моря; d – скорректированное значение возраста подземных вод, с исключением примеси рассолов; е – ^{81}Kr возраст метеорной составляющей, по [8].

(рис. 1, Б) и Белого моря (табл. 1). Основные коллекторы подземных вод представлены четвертичными (Q), каменноугольными (С) и вендскими (падунская (*Vpd*) и мезенская (*Vmz*) свиты) отложениями. Для венда характерно хаотичное переслаивание песчаников и алевролитов, для карбона – последовательное чередование терригенно-карбонатных пород каширского и карбонатных – подольского и мячковского горизонтов.

Для водоносного комплекса *Vpd* в центральной части водосбора характерна обратная гидрохимическая зональность со снижением минерализации подземных вод с 28 до 5 г/л. Эта закономерность в первую очередь вызвана опреснением подземных вод ввиду длительного существования континентальных условий в плейстоцене. Опреснение прекратилось после микулинской трансгрессии ~130 тыс. лет назад. Впоследствии в водоносный комплекс *Vpd* стала поступать сверху солёная поровая вода, отжимаемая под нагрузкой валдайского ледника из морских глин. В процессе формирования долины р. Северная Двина вследствие эрозионной активности воды, вытекающей из тающего ледника, долина прорезала толщу микулинских глин почти до основания. Солёная вода из *Vpd* начала перетекать в долину реки и была частично замещена пресной водой из областей питания (см. рис. 1, Б). Одновременно происходил подток рассолов из более глубоких частей вендского осадочного чехла. Поэтому химический состав подземных вод можно объяснить смешением солёной морской воды и рассолов с талыми водами древних лед-

ников и современной пресной водой атмосферного происхождения (см. рис. 1, А).

Постледниковые морские трансгрессии оказали значительное влияние только на засоление подземных вод в песчано-глинистых отложениях мощного долинного комплекса р. Северная Двина (см. рис 1, Б, QIII–IV) и в данной статье не рассматриваются.

Тридцать пять проб подземных вод было отобрано в 2012–2014 гг. Также были использованы результаты определений по восьми пробам термальных вод, собранным в 2011 г. на Приполярном Урале [11], и десяти пробам И.В.Токарева 2006 г. [3]. Одна проба слабосоленоватых вод в четвертичных отложениях была взята из холодного источника. Остальные пробы, представляющие собой подземные воды из Q, *Vpd*, *Vmz* водоносных горизонтов и «трубок взрыва», отобраны из скважин. Все образцы воды отфильтрованы через 0,45 мкм фильтр в полевых условиях. Измерения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ проводились И.В.Токаревым в Ресурсном центре геоэкологических исследований и моделирования Санкт-Петербургского государственного университета. Четыре пробы, собранные в 2016 г., были проанализированы в МАГАТЭ. Для сравнительных интерпретаций использовались результаты по семи пробам из работы [8].

Результаты и обсуждение. Смешение подземных вод. На основе анализа общих гидрогеологических условий и соотношений ионов (см. таблицу в работе [5]) установлено, что происходят следующие основные процессы смешения подземных вод (см. рис. 1, А):

1) смешение плейстоценовой морской воды и подземных вод «солончатые1» с образованием «солёнаяVpd» вода в верхней части вендских водоносных горизонтов;

2) смешение пресной воды и вышеупомянутой воды «солёнаяVpd» с образованием «солончатая2» воды;

3) смешение пресной воды и рассолов с образованием воды «солёнаяVtz» в нижней части вендских водоносных горизонтов.

Формулы смешения различных типов воды выглядят следующим образом:

$$Cl_{\text{ледниковая}} \cdot x + Cl_{\text{метеорная}} \cdot y + Cl_{\text{рассол (море)}} \cdot (1-x-y) = Cl_{\text{смесь}}$$

$$^{18}O_{\text{ледниковая}} \cdot x + ^{18}O_{\text{метеорная}} \cdot y + ^{18}O_{\text{рассол (море)}} \cdot (1-x-y) = ^{18}O_{\text{смесь}}$$

где $Cl_{\text{смесь}}$ (мг/л) и $^{18}O_{\text{смесь}}$ (‰) – содержания хлора и значения $\delta^{18}O$, принятые по табл. 1 для проб воды, указанных в табл. 2. Конечные элементы смешения показаны на рис. 2.

Конечный член рассола представляет собой Cl^- – 90 000 мг/л и $\delta^{18}O$ – 0‰ (см. UP, P, Lom, 6 БАБ в табл. 1). Формирование рассолов происходило в палеозое [1, 2, 6]. Конечный член морской воды составляет Cl^- – 19 354 мг/л⁻¹ [18] и $\delta^{18}O$ – 0‰ (SMOW). Возраст источника конечного члена ледниковой талой воды предположительно средний плейстоценоголоценовый [8, 10]. В настоящее время значения $\delta^{18}O$ в снежном покрове Антарктиды составляют на побережье от –18 до –30‰, в центральных частях континента до –55‰ [12, 21]. Значения $\delta^{18}O$ плейстоценовых континентальных ледниковых щитов были оценены в –30‰ и менее [7]. Для ледниковых талых вод Лаврентийского покрова в Северной Америке и Скандинавского щита в Северной Европе значения $\delta^{18}O$ были определены в диапазоне от –17 до –25‰ [15, 17] и от –19 до –25‰ [13], соответственно. Подземные воды в системе водоносных комплексов кембрия–венда, сформировавшиеся

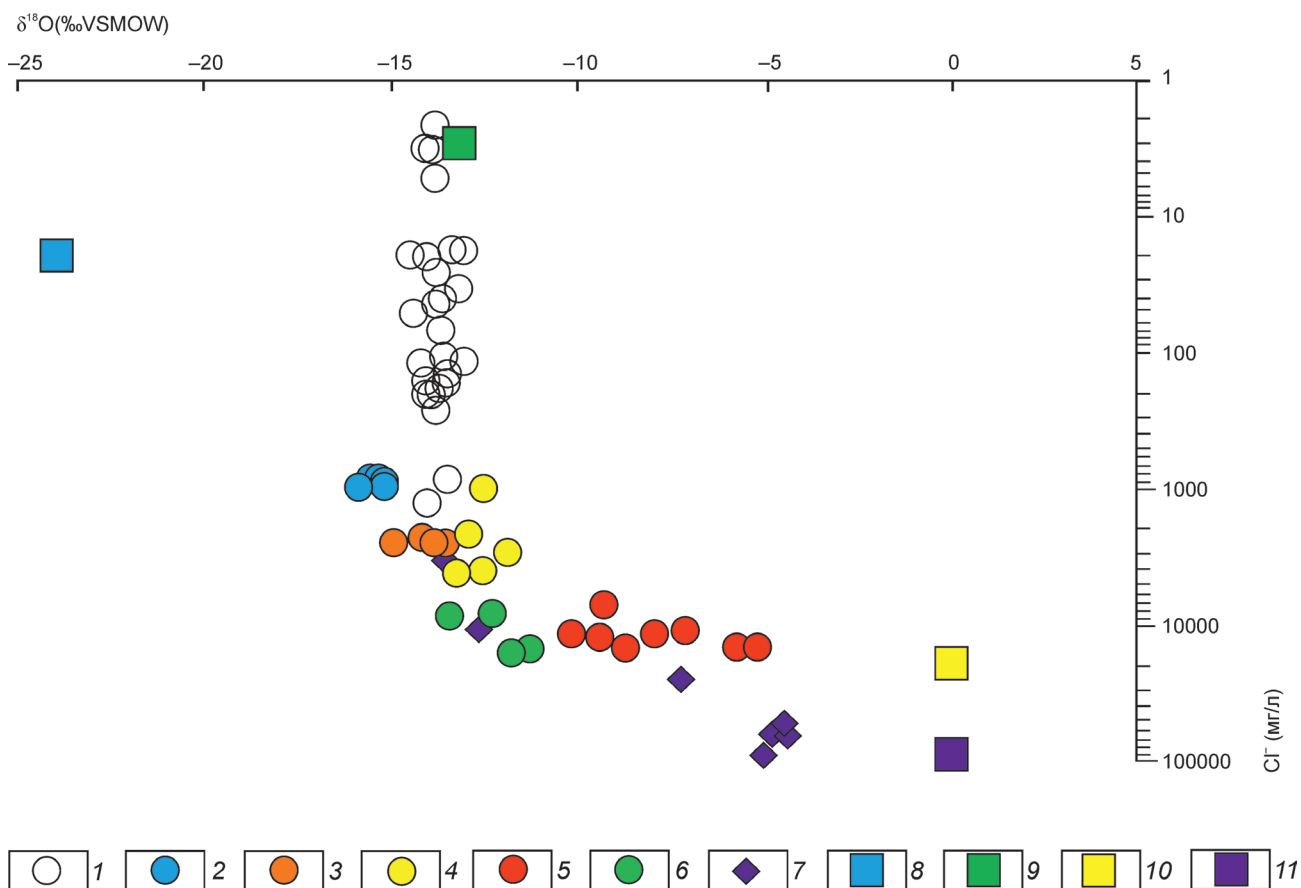


Рис. 2. Связь между Cl^- и $\delta^{18}O$, позволяющая идентифицировать концевые элементы на основе модели смешения:

типы вод: 1 – пресные, 2 – термальные, 3 – солончатые (1), 4 – солончатые (2), 5 – солёные(Vpd), 6 – солёные (Vtz), 7 – из (Gerber et al., 2017); конечные элементы смешения: 8–10 – воды: 8 – талые ледниковые, 9 – метеорные (межледниковые), 10 – морские; 11 – рассолы

2. Пропорции смешения метеорных, ледниковых, морских вод и рассолов в подземных водах, вычисленные по модели смешения

ID Проб	tIII-1	I5	I4	Mi	2 БАБ	27	La5	B2	1 БАБ	B1	No1	Mm
Тип воды	Термальная	«Солоноватая1»				«Солёная Vmz»				«Солоноватая2»		
Метеорная	74	84	78	89	71	77	87	80	63	76	53	78
Ледниковая	25	13	19	8	25	13	3	3	25	8	26	11
Рассол	1	3	3	3	3	10	10	17	12	16	21	11

ID Проб	Ts	I1	I3	Vo ₂₀₀₆	Vo ₂₀₁₃	Kw	K2	10d	4d	16h
Тип воды	«Солёная Vpd»					Слабосоленоватая вода Q		Пресная вода Vpd		
Метеорная	0	0	22	0	16	87	78	84	98	91
Ледниковая	51	24	19	46	46	8	15	16	1	7
Морская	49	76	59	54	38	5	7	0	1	2

Примечание. Пробы 1–2 БАБ представляют результаты, полученные на южном склоне Балтийского щита в подземных водах Балтийского артезианского бассейна [8].

за счёт пополнения изотопно-лёгкой подледной тающей водой из Скандинавского ледникового щита, характеризуются значениями $\delta^{18}\text{O}$ от $-18,5$ до -23‰ [16, 20]. Учитывая все обстоятельства, выбранный конечной элемент ледниковой воды характеризуется средними значениями $\delta^{18}\text{O}$ -24‰ , а Cl^- – 20 мг/л [16]. Четвёртый компонент (пресная вода) мог участвовать в формировании состава подземных вод также в среднем плейстоцене–голоцене. $\delta^{18}\text{O}$ четвертого компонента составляет $-13,2\text{‰}$, что принимается в соответствии со средневзвешенным значением для станции GNIP (Глобальная сеть изотопов в осадках) Архангельск [9], а Cl^- – 3 мг/л.

Пропорции смешения четырёх конечных элементов, рассчитанные по Cl^- и $\delta^{18}\text{O}$ для каждого типа подземных вод, приведены в табл. 2.

Пресные воды в водоносных горизонтах *Vpd* и в трубках взрыва образовались в результате инфильтрации атмосферных осадков в областях питания (см. рис. 1, Б). В составе старейших пресных вод присутствует таялая вода последнего ледникового периода. Около речных долин они увеличивали солёность, смешиваясь с реликтовыми водами микулинской трансгрессии. Пропорции смешения (см. табл. 2) составляют (в %): морской воды до 2, ледниковой воды до 16 и пресной межледниковой воды – 84–98. ^{14}C и ^{234}U – ^{238}U возраст этой воды колеблется от современного до $11,8 \pm 1,6$ тыс. лет (голоцен).

Слабосоленоватая вода в четвертичном водоносном горизонте (Q) образуется аналогичным образом.

Эти воды заключены в слое песчано-гравийных отложений последнего ледникового периода, лежащем на глинистых отложениях микулинского моря и перекрытом моренными валунными суглинками. Они представляют собой смесь (в %): морской воды – 5–7, ледниковой воды – 8–15 и пресной межледниковой воды – 78–87. ^{14}C возраст этой воды колеблется от $7,53 \pm 0,18$ до $16,2 \pm 0,26$ тыс. лет (голоцен–поздний плейстоцен).

Источником слабосоленоватых термальных вод, отобранных на Приполярном Урале, были метеорные пресные воды, протекавшие через глубокие части системы водоносных горизонтов, где они смешивались с рассолами и впоследствии разгружались на земную поверхность. Пропорции смешения (см. табл. 2) соответствуют полученным по гидрохимическим данным: рассол 1% и пресная вода 99% [11]. Кроме того, по изотопным данным установлено, что пресная вода образуется путём смешения 74% метеорной воды и 25% ледниковой воды, связанной с таянием вечной мерзлоты. ^{14}C возраст термальной воды колеблется от $5,44 \pm 0,48$ до $6,97 \pm 0,9$ тыс. лет.

Максимальная доля ледниковой воды характерна для «солёной *Vpd*» – 19–51%. В этом типе вод метеорная составляющая отсутствует в большинстве проб. Доля морской воды составляет 49–76% (скважина Vo_{2013} фонтанирует с 2006 г., с этим связано опреснение её воды). Кроме того, следует отметить, что если «солёная *Vpd*» представляет собой смесь морской воды микулинского моря и «солончатой1», то отсутствие метеорного компонента в ней указывает на то, что

этот компонент также отсутствовал и в «солонатовой», а ледниковый компонент в последней составлял 97%. В то же время, согласно табл. 2, «солонатовая» содержит (в %): рассолов – 3, ледниковых – 8–19 и межледниковых вод – 78–89. Это свидетельствует о том, что «солёная Vpd» смешивалась с более древней «ледниковой солонатовой», аналогичной по составу современной «метеорной солонатовой». Возраст этой более древней воды должен быть больше возраста воды микулинского моря, то есть относиться к среднему плейстоцену. В пробе 1 БАБ, аналогичной по изотопно-химическому составу, Gerber с соавторами [8] определили его по ^{81}Kr в 07 ± 27 тыс. лет. Возраст же пресноводного компонента в современной «метеорной солонатовой» воде определён по ^{14}C и ^{234}U – ^{238}U и составил от $26,2 \pm 3,9$ до $32,96 \pm 2,3$ тыс. лет [10].

Вода «солёная Vmz» образуется путём разбавления пресной водой рассолов, вытекающих из ниже лежащих водоносных горизонтов (см. рис. 1, Б). Её состав формируется путём смешивания 10–17% рассола, 3–13% ледниковой воды и 77–87% межледниковой воды. И похож на состав воды из скважины 1ВAB [8] по солёности и изотопному составу. ^{234}U – ^{238}U возраст пресноводного компонента «солёной Vmz» воды может составлять до 307 ± 115 тыс. лет [10] (см. табл. 1), что сопоставимо с датированием ледниково-метеорного компонента воды в скважине 1ВAB – 541 ± 28 тыс. лет [8]. Таким образом, разубоживание рассолов с формированием состава «солёной Vmz» воды в опробованной автором в интервале от –160 до –240 абс. метров верхней части мезенской свиты венда происходило начиная со среднего плейстоцена. Более того, в работе [4] установлено, что солонатовые и солёные воды с общей минерализацией менее 35 г/л прослеживаются до глубины –600 абс. метров в западной части Мезенской синеклизы. Вышеприведённые датировки позволяют связывать образование столь мощной зоны опреснения осадочной толщи в первую очередь с проникновением ледниковых талых вод среднего плейстоцена.

Вода «солонатовая2» представляет собой смесь «солёной Vpd» и пресной воды. Поэтому она содержит воды (в %): морской – 11–21, ледниковой – 8–26 и межледниковой – 53–78. Возраст формирования наблюдаемого современного состава этих вод составляет от $25,1 \pm 0,7$ до $39,2 \pm 6,3$ тыс. лет.

В заключение следует ещё раз отметить, что полученные результаты отражают эволюцию подземных вод в период от среднего плейстоцена до наших дней. В течение среднего плейстоцена из-за таяния ледниковых покровов ледниковые талые воды проникли на глубину до 600 м в западной части Мезенской синеклизы. В это время рассолы разбавлялись прес-

ной водой в нижней части вендской толщи, а талая ледниковая вода доминировала в верхней части. Трансгрессия микулинского моря произошла в начале верхнего плейстоцена. Подземные воды в верхней части вендских отложений под толщей микулинских глин в настоящее время содержат солёную воду с максимальным обогащением тяжёлыми изотопами. Талая вода последнего ледникового периода видна в пресной и слегка солонатовой воде водоносных горизонтов венда и четвертичного периода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 20–05–00045_А, 18–05–60151_Арктика и 18–0501041_А), УрО РАН (проект АААА-А18–118012390242–5) и Министерства образования и науки России (проект АААА-А19–119011890018–3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гатальский М.А. Подземные воды и газы палеозоя северной половины Русской платформы. – Л.: Гостоптехиздат, 1954.
2. Коротков А.И. Гидрогеохимический анализ при региональных геологических и гидрогеологических исследованиях. – Л.: Недра, 1983.
3. Коротков А.И., Потанов А.А., Румынин В.Г. Редкие типы минеральных вод Среднерусского артезианского бассейна. – СПб.: Наука, 2013.
4. Малов А.И. Взаимодействие вода–порода в песчано-глинистых отложениях венда Мезенской синеклизы // Литология и полезные ископаемые. – 2004. – № 4. – С. 401–413.
5. Малов А.И. Геохимические индикаторы формирования подземных вод Юго-Восточного Беломорья // Отечественная геология. – 2019. – № 4. – С. 75–83.
6. Малов А.И. Формирование рассолов в Мезенской синеклизе // Водные ресурсы. – 2001. – № 6. – С. 677–683.
7. Dansgaard W., Tauber H. Glacier oxygen-18 content and Pleistocene ocean temperatures // Science. – 1969. – Vol. 166. – P. 499–502.
8. Gerber C., Vaikmäe R., Aeschbach W. et al. Using ^{81}Kr and noble gases to characterize and date groundwater and brines in the Baltic Artesian Basin on the one-million-year timescale // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2017. – Vol. 205. – P. 187–210.
9. IAEA/WMO. Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. 2019. Accessible at: <https://nucleus.iaea.org/wiser>
10. Malov A.I. Estimation of uranium migration parameters in sandstone aquifers // Journal of Environmental Radioactivity. – 2016. – Vol. 153. – P. 61–67.
11. Malov A. I., Bolotov I. N., Pokrovsky O. S. et al. Modeling past and present activity of a subarctic hydrothermal system using O, H, C, U and Th isotopes // Applied Geochemistry. – 2015. – Vol. 63. – P. 93–104.

12. *Masson-Delmotte V. et al.* A review of Antarctic surface snow isotopic composition: Observations, atmospheric circulation, and isotopic modeling // *Journal of Climate*. – 2008. – Vol. 21. – P. 3359–3387.
13. *Olausson E.* 1982. Stable isotopes / The Pleistocene / Holocene Boundary in South-western Sweden. – Uppsala: Sveriges geologiska undersökning 794E.– 1982.– P. 82–92.
14. *Pärn J., Raidla V., Rein V., Martma T. et al.* The recharge of glacial meltwater and its influence on the geochemical evolution of groundwater in the Ordovician-Cambrian aquifer system, northern part of the Baltic Artesian Basin // *Applied Geochemistry*. – 2016. – Vol.72. – P. 125–135.
15. *Person M., McIntosh J.C., Remenda V., Bense V.* Pleistocene hydrology of North America: the role of ice sheets in reorganizing groundwater systems // *Reviews of Geophysics*. – 2007. – Vol. 45. – No. 3007. – P. 1–28.
16. *Raidla V., Kirsimäe K., Vaikmäe R., et al.* Geochemical evolution of groundwater in the Cambrian–Vendian aquifer system of the Baltic Basin // *Chemical Geology*. – 2009. – Vol. 258. – P. 219–231.
17. *Remenda V.H., Cherry J.A., Edwards T.W.D.* Isotopic composition of old ground water from Lake Agassiz: implications for late Pleistocene climate // *Science*. – 1994. – Vol. 266. – P. 1975–1978.
18. *Riley J.P., Skirrow G.* *Chemical Oceanography*. – London: Academic Press, 1965.
19. *Saks T., Sennikovs J., Timuhins A. et al.* Groundwater flow beneath the Scandinavian ice sheet in the Baltic Basin / High lights of Groundwater Research in the Baltic Artesian Basin. – Riga, 2012. – P. 75–90.
20. *Vaikmäe R., Kaup E., Marand A. et al.* The Cambrian Vendian aquifer, Estonia / *The Natural Baseline Quality of Groundwater*. – Blackwell Publishing, 2008. – P. 353–371.
21. *Werner M., Jouzel J., Masson-Delmotte V. et al.* Reconciling glacial Antarctic water stable isotopes with ice sheet topography and the isotopic paleothermometer // *Nature Communication*. – 2010. – Vol. 9. – No. 3537. – P. 1–10.
22. *Zuzevicius A.* The groundwater dynamics in the southern part of the Baltic Artesian Basin during the Late Pleistocene // *Baltica*. – 2010. – Vol. 23. – P. 1–12.

REFERENCES

1. *Gatal'skiy M.A.* Podzemnyye vody i gazy paleozoya severnoy poloviny Russkoy platformy [Underground waters and Paleozoic gases of the northern half of the Russian platform]. Leningrad, Gostoptekhizdat publ. 1954.
2. *Korotkov A.I.* Gidrogeokhimicheskiy analiz pri regional'nykh geologicheskikh i gidrogeologicheskikh issledovaniyakh [Hydrogeochemical analysis in regional geological and hydrogeological studies]. Leningrad, Nedra publ. 1983.
3. *Korotkov A.I., Potapov A.A., Rumynin V.G.* Redkiye tipy mineral'nykh vod Srednerusskogo artezianskogo basseyna [Rare types of mineral waters of the Central Russian artesian basin]. Saint Petersburg, Nauka publ. 2013.
4. *Malov A.I.* Vzaimodeystviye voda-poroda v peschanoglinistykh otlozheniyakh venda Mezenskoy sineklizy [Water-rock interaction in sandy-clay deposits of the Vendian of the Mezen syncline]. *Litologiya i poleznyye iskopyemye*. 2004. no. 4. P. 401–413.
5. *Malov A.I.* Geokhimicheskiye indikatory formirovaniya podzemnykh vod Yugo-Vostochnogo Belomor'ya [Geochemical indicators of the formation of groundwater in the South-East White Sea]. *Otechestvennaya geologiya*. 2019. no. 4. P. 75–83.
6. *Malov A.I.* Formirovaniye rassolov v Mezenskoy sineklize [The formation of brines in the Mezen syncline]. *Vodnyye resursy*. 2001. no. 6, P. 677–683.
7. *Dansgaard W., Tauber H.* Glacier oxygen-18 content and Pleistocene ocean temperatures. *Science*. 1969. Vol. 166. P. 499–502.
8. *Gerber C., Vaikmäe R., Aeschbach W., et al.* Using ⁸¹Kr and noble gases to characterize and date groundwater and brines in the Baltic Artesian Basin on the one-million-year timescale. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2017. Vol. 205. P. 187–210.
9. *IAEA/WMO.* Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. 2019. Accessible at: <https://nucleus.iaea.org/wiser>
10. *Malov A.I.* Estimation of uranium migration parameters in sandstone aquifers. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016. Vol. 153. P. 61–67.
11. *Malov A.I., Bolotov I.N., Pokrovsky O.S., et al.* Modeling past and present activity of a subarctic hydrothermal system using O, H, C, U and Th isotopes. *Applied Geochemistry*. 2015. Vol. 63. P. 93–104.
12. *Masson-Delmotte V. et al.* A review of Antarctic surface snow isotopic composition: Observations, atmospheric circulation, and isotopic modeling. *Journal of Climate*. 2008. Vol. 21. P. 3359–3387.
13. *Olausson E.* 1982. Stable isotopes. The Pleistocene Holocene Boundary in South-western Sweden. Uppsala: Sveriges geologiska undersökning 794E, 1982. P. 82–92.
14. *Pärn J., Raidla V., Rein V., Martma T., Ivask J., Mokrik R., Erg K.* The recharge of glacial meltwater and its influence on the geochemical evolution of groundwater in the Ordovician-Cambrian aquifer system, northern part of the Baltic Artesian Basin // *Applied Geochemistry*. 2016. Vol. 72. P. 125–135.
15. *Person M., McIntosh J.C., Remenda V., Bense V.* 2007. Pleistocene hydrology of North America: the role of ice sheets in reorganizing groundwater systems. *Reviews of Geophysics*. Vol. 45. No. 3007. P. 1–28.
16. *Raidla V., Kirsimäe K., Vaikmäe R., Jõeht A., Karro E., Marandi A., Savitskaja L.* Geochemical evolution of groundwater in the Cambrian–Vendian aquifer system of the Baltic Basin. *Chemical Geology*. 2009. Vol. 258. P. 219–231.

17. *Remenda V.H., Cherry J.A., Edwards T.W.D.* Isotopic composition of old ground water from Lake Agassiz: implications for late Pleistocene climate. *Science*. 1994. Vol. 266. P. 1975–1978.
18. *Riley J.P., Skirrow G.* *Chemical Oceanography*. London: Academic Press, 1965.
19. *Saks T., Sennikovs J., Timuhins A., et al.* Groundwater flow beneath the Scandinavian ice sheet in the Baltic Basin. *Highlights of Groundwater Research in the Baltic Artesian Basin*. Riga, 2012. P. 75–90.
20. *Vaikmäe R., Kaup E., Marand A., et al.* The Cambrian Vendian aquifer, Estonia. *The Natural Baseline Quality of Groundwater*. Blackwell Publishing, 2008. P. 353–371.
21. *Werner M., Jouzel J., Masson-Delmotte V. et al.* Reconciling glacial Antarctic water stable isotopes with ice sheet topography and the isotopic paleothermometer. *Nature Communication*. 2010. Vol.9. No. 3537. P. 1–10.
22. *Zuzevicius A.* The groundwater dynamics in the southern part of the Baltic Artesian Basin during the Late Pleistocene. *Baltica*. 2010. Vol. 23. P. 1–12.

Журнал «Отечественная геология» принимает участие в геологических конференциях, совещаниях, съездах в качестве информационного партнёра, освещая на своих страницах важные события отрасли.

Приглашаем к сотрудничеству представителей геологических, горно-геологических, горнодобывающих организаций и предприятий, отраслевых научно-исследовательских, академических и образовательных институтов по вопросам размещения рекламы или издания целевого номера.