Эволюция подземной гидросферы на прибрежной арктической территории

Малов А.И.

*Федеральный исследовательский Центр комплексного изучения Арктики им. акад. Н.П. Лаверова
РАН, Архангельск, Россия, E-mail: malovai@yandex.ru*

АННОТАЦИЯ: Выполнена реконструкция геохимических процессов и климатических изменений в плейстоцен-голоцене по изменениям изотопно-химического состава подземных вод на восточном склоне Балтийского щита за последние 400 тысяч лет. 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 тысяч лет назад пресные воды проникли в осадочный чехол Мезенской синеклизы на глубину до 600 м. Трансгрессия моря 130-115 тысяч лет назад привела к засолению подземных вод в верхней части осадочного чехла. Последующее таяние ледника 13-12 тысяч лет назад и инфильтрация атмосферных осадков в последние 12 тысяч лет привели к формированию пресных вод до глубин 100-200 метров.

Underground hydrosphere evolution in the coastal Arctic territory

Malov A.I.

*N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Russian Academy of Sciences RAS, Arkhangelsk, Russia
malovai@yandex.ru*

ABSTRACT: 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 thousand years. The degree of participation of melt glacier-, sea- and meteoric waters and brines in the formation of groundwater is estimated. It was established that, as a result of the melting of the ice sheets 400-130 ka ago, fresh water penetrated the sedimentary cover of the Mezen syncline to a depth of 600 m. The sea transgression 130-115 ka ago led to salinization of groundwater in the upper part of the sedimentary cover. The subsequent melting of the glacier 13-12 ka ago and the infiltration of precipitation in the last 12 ka led to the formation of fresh water to depths of 100-200 m.

ВВЕДЕНИЕ.

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 [1, 2]. Среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ талых ледниковых вод принималось равным -24 ‰ на основании обнаружения в северной части БАБ на южном склоне БЩ наиболее истощенных подземных вод со значениями $\delta^{18}\text{O} \sim -22\text{‰}$ на фоне среднегодовых осадков -10.4‰. Тремя компонентами смешения были талые воды ледников, метеорные воды и рассолы. В осадочном Северо-Двинском артезианском бассейне, расположенном восточнее БЩ, в Мезенской синеклизе, стабильные изотопы практически не изучались.

Кроме того здесь значительна роль морских вод в формировании состава подземной гидросферы. Поэтому целью данного исследования была 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 [3] датирования подземных вод.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Пробы были отобраны в районе Юго-Восточного побережья Белого моря, на водосборной площади реки Северная Двина (рис. 1Б) и Белого моря. Основные коллекторы подземных вод представлены четвертичными (Q), каменноугольными (C), и вендскими (Vpd и Vmz) отложениями. Для водоносного комплекса Vpd в центральной части водосбора характерна обратная гидрохимическая зональ-

ность 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 соленая поровая вода, отжимаемая под нагрузкой валдайского ледника из морских глин. В процессе формирования долины реки Северная Двина вследствие эрозионной активности воды, вытекающей из тающего ледника, долина прорезала толщу микулинских глин почти до основания. Соленая вода из Vpd начала перетекать в долину реки и была частично замещена пресной водой из областей питания (рис. 1Б). Одновременно происходил подток рассолов из более глубоких частей вендского осадочного чехла. Поэтому химический состав подземных вод можно объяснить смешением соленой морской воды и

рассолов с тальми водами древних ледников и современной пресной водой атмосферного происхождения (рис. 1А).

Сорок три пробы воды были отобраны в 2012–2014 годах и десять – в 2006 году [4]. Термальные воды были собраны на приполярном Урале [5] для сравнения. Одна проба слабо солоноватых вод в Q отложениях была взята из холодного источника. Остальные пробы отобраны из скважин, и представляют подземные воды из O, Vpd, Vmz водоносных горизонтов и «трубок взрыва» (табл. 1). Все образцы воды были отфильтрованы через 0,45 мкм фильтр в полевых условиях. Измерения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ проводились в Ресурсном центре геоэкологических исследований и моделирования СПбГУ. Пять образцов были собраны в 2016 году и проанализированы в МАГАТЭ.

Для сравнительных интерпретаций были использованы результаты по семи пробам из работы [2].

Рис. 1. Схемы смешения подземных вод. А – 1) смешение морской воды с “солоноватыми I”- реликтовыми водами с образованием “соленых Vpd”, 2) Смешение “соленых Vpd” с пресными водами с образованием “солоноватых 2”, 3) Смешение рассолов с тальми ледниковыми водами с образованием “соленых Vmz”. Б – концептуальная модель смешения основных потоков подземных вод и рассолов. Условные обозначения на рис. 1А [3]

Формулы смешения выглядят следующим образом:

$$Cl_{\text{Glacial}} \cdot x + Cl_{\text{Interglacial}} \cdot y + Cl_{\text{Brine (Sea)}} (1 - x - y) = Cl_{\text{Mix}}$$

$$^{18}\text{O}_{\text{Glacial}} \cdot x + ^{18}\text{O}_{\text{Interglacial}} \cdot y + ^{18}\text{O}_{\text{Brine (Sea)}} (1 - x - y) = ^{18}\text{O}_{\text{Mix}}$$

, где Cl_{Mix} (мг/л) и $^{18}\text{O}_{\text{Mix}}$ (‰) – содержания хлора и значения $\delta^{18}\text{O}$ в отобранных пробах воды, указанных в таблице 2. Значения Cl and ^{18}O (glacial, interglacial, brine and sea): (20 и -24, 3 и -13.2, 90000 и 0, 19354 и 0), соответственно (см. рис. 2).

Результаты расчетов компонентов смешения представлены в таблице 2.

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

Таблица 1. Средние изотопные составы подземных вод и рассолов

Типы подземных вод	Количество проб	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
Пресные воды в «трубках взрыва»	2	-13	-94.5
Пресные воды в водоносных горизонтах Vpd и слабо солоноватые в Q отложениях	22	-13.8	-100
Солоноватые воды, отобранные на приполярном Урале	8	-15.5	-113.9
Слабо солоноватые воды в водоносных горизонтах Vpd («солоноватые 1»)	4	-14.1	-106.7
Слабо солоноватые воды в водоносных горизонтах € БАБ [2]	1	-13.61	-100.7
Солоноватые воды в водоносных горизонтах Vpd («солоноватые 2»)	7	-12.5	-94.1
Сильно солоноватые воды в водоносных горизонтах Vpd («соленые Vpd»)	9	-7.7	-58.3
Сильно солоноватые и соленые воды в водоносных горизонтах Vmz («соленые Vmz»)	5	-12.2	-94.4
Сильно солоноватые воды в водоносных горизонтах € БАБ (Gerber et al., 2017)	1	-12.63	-92.8
Рассолы в водоносных горизонтах € БАБ [2]	5	-5.19	-42.08

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Слабо солоноватая 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 5-7% морской воды, 8-15% ледни-

ковой воды и 78-87% пресной межледниковой воды. ^{14}C возраст этой воды колеблется от $7,53 \pm 0,18$ до $16,2 \pm 0,26$ тыс. лет (голоцен - поздний плейстоцен).

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

Источником слабо солоноватых 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 (табл. 2) соответствуют полученным по гидрохимическим данным: 1% рассол и 99% пресная вода [5]. Кроме того, по изотопным данным установлено, что пресная вода образуется путем смешивания 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 «соленой Vpd»: 19-51%. В этом типе вод метеорная составляющая отсутствует в большинстве проб. Доля морской воды составляет 49-76% (скважина Vo₂₀₁₃ фонтанирует с 2006 года, с этим связано опреснение ее воды). Кроме того, следует отметить, что если «соленая Vpd» представляет собой смесь морской воды микулинского моря и «солоноватой 1», то отсутствие метеорного компонента в ней указывает на то, что этот компонент также отсутствовал и в «солоноватой 1», а ледниковый компонент в последней составлял 97%. В то же время, согласно таблице 2, «солоноватая 1» содержит 3% рассолов, 8-19% ледниковых вод и 78-89% межледниковых вод. Это свидетельствует о том, что «соленая Vpd» смешивалась с более древней, «ледниковой солоноватой 1», аналогичной по составу «современной межледниковой солоноватой 1». Возраст этой более

древней воды должен быть больше возраста воды микулинского моря, то есть относиться к среднему плейстоцену. В пробе 1БАВ, аналогичной по изотопно-химическому составу, Gerber et al. [2] определили его по ^{81}Kr : $407 \pm$

27 тыс. лет. Возраст же пресноводного компонента в «современной межледниковой солоноватой 1» определен по ^{14}C и ^{234}U - ^{238}U : от $26,2 \pm 3,9$ до $32,96 \pm 2,3$ тыс. лет [3].

Таблица 2. Пропорции метеорных (пресных, современных и межледниковых) вод, ледниковых (талых) вод, морских вод и рассолов в подземных водах Северо-Двинского артезианского бассейна (Мезенской синеклизы) на восточном склоне Балтийского щита, вычисленные по модели смешения. Пробы 1-2 БАВ представляют результаты, полученные на южном склоне Балтийского щита в подземных водах Балтийского артезианского бассейна Gerber et al. (2017).

ID Проб	tП-1	I5	I4	Mi	2 БАВ	27	La5	B2	1 БАВ	B1	No1	Mm
Тип воды	Тер-мальная	«солоноватая1»				«Соленая 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	«Соленая Vpd»					Слабо солоноватая вода Q		Пресная вода Vpd		
Метеорная	0	0	22	0	16	87	78	84	98	91
Ледниковая 1	51	24	19	46	46	8	15	16	1	7
Морская	49	76	59	54	38	5	7	0	1	2

Вода «соленая Vmz» образуется путем разбавления пресной водой рассолов, вытекающих из нижележащих водоносных горизонтов (рис. 1Б). Ее состав формируется путем смешивания 10-17% рассола, 3-13% ледниковой воды и 77-87% межледниковой воды. Он похож на состав воды из скважины 1БАВ [2] по солености и изотопному составу. ^{234}U - ^{238}U возраст пресноводного компонента «соленой Vmz» может составлять до 307 ± 115 тыс. лет [3], что сопоставимо с датированием метеорного компонента воды в скважине 1БАВ: 541 ± 28 тыс. лет [2]. Таким образом, разубоживание рассолов с формированием состава «соленой Vmz» происходило начиная со среднего плейстоцена. Рассолы же имеют палеозойский возраст [5]. Вода «солоноватая2» представляет собой смесь «соленой Vpd» и пресной воды в соотношении 1:2 - 1:4,4 согласно гидрохимическим данным [3]. Поэтому она содержит 11–21% морской воды, 8–26% ледниковой воды и 53–78% межледниковой воды. Возраст формирования наблюдаемого современного состава этих вод составляет от $25,1 \pm 0,7$ до $39,2 \pm 6,3$ тыс. лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Полученные результаты отражают эволюцию подземных вод в период от среднего плейстоцена до наших дней. В течение среднего плей-

стоцена из-за таяния ледниковых покровов ледниковые талые воды проникли на глубину 600 м в западной части Мезенской синеклизы. В это время рассолы разбавлялись пресной 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 соленую воду с максимальным обогащением тяжелыми изотопами. Талая вода последнего ледникового периода видна в пресной и слегка солоноватой воде водоносных горизонтов венда и четвертичного периода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Raidla V, Kirsimäe K, Vaikmäe R et al. Geochemical evolution of groundwater in the Cambrian–Vendian aquifer system of the Baltic Basin. Chem. Geol. 2009; 258:219-231.
2. 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. Geochim. Cosmochim. Acta 2017; 205:187-210.
3. Malov AI. Evolution of the groundwater chemistry in the coastal aquifers of the south-eastern White Sea

area (NW Russia) using ^{14}C and ^{234}U - ^{238}U dating. *Science of the Total Environment*. 2018; 616–617:1208-1223.

4. Malov AI, Tokarev IV. Using stable isotopes to characterize the conditions of groundwater formation on the eastern slope of the Baltic Shield (NW Russia). *J Hydrol*. 2019. 578:124130.

5. Malov AI, Bolotov IN, Pokrovsky OS. Modeling past and present activity of a subarctic hydrothermal

system using O, H, C, U and Th isotopes. *Appl. Geochem*. 2015; 63:93-104.

6. Малов АИ. Магний в рассолах Северо-Двинского артезианского бассейна, как индикатор кимберлитового магматизма. Доклады РАН. 2001. 377-1: 82-85.