

ИЗОТОПНЫЙ БАЛАНС ЧЕРНОМОРО-АЗОВСКОГО БАССЕЙНА В ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ

Дикарёв В.А., Николаев С.Д.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет,
dikarev@rambler.ru

Черноморо-Азовский бассейн является наиболее хорошо изученным изолированным водоёмом с точки зрения его изотопного и палеоизотопного состава. На его примере были отработаны основные методические вопросы и приёмы изотопно-палеогеографических исследований. Наиболее важным элементом в палеогеографических реконструкциях является изотоп кислорода, как наиболее распространённого элемента геосферы. Он имеет три стабильных изотопа: ^{16}O , ^{17}O и ^{18}O . Обычно определяют соотношение ^{18}O к ^{16}O т.к. они наиболее распространены и имеют наибольшую разницу масс. В качестве эталона используется определённое в 1976 году отношение $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ для осреднённого состава океанической воды (SMOW, standard mean ocean water). Для всех остальных объектов изучения определяется отклонение от стандарта SMOW в промилле – $\delta^{18}\text{O}$. Например, средний современный изотопный состав Черноморского бассейна -2.3‰ [Николаев, 1976].

Голоценовая история Черноморского бассейна (Понтийский этап) начинается с подъёма уровня Мирового Океана выше Босфорского порога и начала поступления солёных Средиземноморских вод в пресный Новозёвксинский бассейн [Янина, 2012]. В ходе этого процесса, который по данным некоторых исследователей носил катастрофический характер, изменился и изотопный состав вод Черноморско-Азовского бассейна, пока в ходе всей голоценовой истории не достиг современных значений. В нашем исследовании мы попытаемся определить, какие источники и в каких масштабах влияли на формирование изотопного состава вод моря в среднем и позднем голоцене.

Современный изотопный баланс Чёрного моря складывается из следующих составляющих:

Приход

Речной сток – 338 км³/год

Атмосферные осадки – 238 км³/год

Приток Средиземноморских вод через Босфор – 176 км³/год

Приток Азовских вод через Керченский пролив – 50 км³/год

Итого – 802 км³/год

Расход

Испарение – 396 км³/год

Сток через Босфор – 371 км³/год

Сток через Керченский пролив – 33 км³/год

Итого – 800 км³/год [Гидрометеорология, 1991]

Реками в Чёрное море ежегодно заносится 338 км³ пресной воды. Из этого количества 86 % дают десять крупных рек: Дунай — 200 км³ (57.5 %), Днепр — 43.5 км³ (12.5 %), Риони — 13.37 км³ (3.8 %), Днестр — 9.1 км³ (2.6 %), Чорохи — 8.71 км³ (2.5 %), Кызыл-Ирмак — 5.90 км³ (1.7 %), Сакарья — 5.60 км³ (1.6 %), Ешиль-Ирмак — 5.30 км³ (1.5 %), Кодори — 4.17 км³ (1.2 %) и Бзыби — 3.79 км³ (1.1 %). Изотопный состав поступающих в море речных вод можно представить следующим образом:

Дунай (57.5%) – $\delta^{18}\text{O}$ от -8.3‰ до -9.5‰.

Днепр (12.5%) – $\delta^{18}\text{O}$ -5.6‰.

Риони (3.8%) – $\delta^{18}\text{O}$ -11.6‰.

Днестр (2.6%) – (примерно равен Днепру), $\delta^{18}\text{O}$ -5.6‰.

Остальные реки (23.6%) – $\delta^{18}\text{O}$ в среднем -11.7‰ (Чорохи -11.5‰; Кодори -11.3‰; Мзымта -12.3‰) [Николаев, 1976].

Средневзвешенное значение рассчитывается по следующей формуле:

$57.5\% \times (-8.3\text{‰}) + 12.5\% \times (-5.6\text{‰}) + 3.8\% \times (-11.6\text{‰}) + 2.6\% \times (-5.6\text{‰}) + 23.6\% \times (-11.7\text{‰}) / 100 =$
-8.8‰ (при Дунае -8.3‰) или

$57.5\% \times (-9.5\%) + 12.5\% \times (-5.6\%) + 3.8\% \times (-11.6\%) + 2.6\% \times (-5.6\%) + 23.6\% \times (-11.7\%) / 100 = -9.5\%$ (при Дунае -9.5%), т.е. изотопный состав вод Дуная является определяющим для изотопного состава всего речного стока.

Значения $\delta^{18}\text{O}$ для атмосферных осадков составляет -7% [Ферронский, 1983] или -6.5% [Ветштейн, 1982], приток из Босфора $\delta^{18}\text{O} = +1.5\%$, приток из Керченского пролива $\delta^{18}\text{O} = -3.4\%$ (среднее для Азовского моря). Изотопные значения в расходной части баланса будут следующие: испарение $\delta^{18}\text{O} = -9\%$ [Ветштейн, 1982], отток в Босфор $\delta^{18}\text{O} = -2.3\%$ (среднее значения воды открытой части Черного моря), отток в Керченский пролив $\delta^{18}\text{O} = -2.3\%$ [Николаев, 1976].

Составим изотопно-материальный баланс, приравняв приход к расходу:

$$(1) V_{\text{рекх}} \delta^{18}\text{O}_{\text{рек}} + V_{\text{атм.ос.х}} \delta^{18}\text{O}_{\text{атм.ос.}} + V_{\text{из.Аз.м.х}} \delta^{18}\text{O}_{\text{Аз.м.}} + V_{\text{из.Ср.м.}} \delta^{18}\text{O}_{\text{Ср.м.}} = V_{\text{сток в Босфх}} \delta^{18}\text{O}_{\text{Чер.м.}} + V_{\text{исп.х}} \delta^{18}\text{O}_{\text{исп.}} + V_{\text{в.Аз.м.х}} \delta^{18}\text{O}_{\text{Чер.м.}}$$

Это выражение справедливо для стабильного положения уровня моря, при котором приход примерно равен расходу, а излишек в виде нескольких кубокилометров, представляющих примерно 0.5% всего баланса, стекает через Босфор в Мраморное море. Далее мы проанализируем, как бы менялся изотопный состав Черного моря при изменении поступления Средиземноморских вод. Для этого введём в уравнение объем воды умноженный на среднее значение изотопного состава по кислороду:

$$V_{\text{Чер.м.х}} \delta^{18}\text{O} = 537000 \text{ км}^3 [\text{Суховой, 1986}] \times -2.3\% [\text{Николаев, 1976}]$$

Уравнение для изотопного состава моря примет в этом случае следующий вид:

$$(2) (V_{\text{Чер.м.х}} \delta^{18}\text{O}_{\text{Чер.м.}} + V_{\text{рекх}} \delta^{18}\text{O}_{\text{рек}} + V_{\text{атм.ос.х}} \delta^{18}\text{O}_{\text{атм.ос.}} + V_{\text{из.Аз.м.х}} \delta^{18}\text{O}_{\text{Аз.м.}} + V_{\text{из.Ср.м.х}} \delta^{18}\text{O}_{\text{Ср.м.}} - V_{\text{сток в Босфх}} \delta^{18}\text{O}_{\text{Чер.м.}} - V_{\text{исп.х}} \delta^{18}\text{O}_{\text{исп.}} - V_{\text{в.Аз.м.х}} \delta^{18}\text{O}_{\text{Чер.м.}}) / V_{\text{Чер.м.}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{Чер.м.}}$$

Вычислив расчетное значение $\delta^{18}\text{O}_{\text{Чер.м.}}$ мы получим -2.3001% , т.е. расчетное значение с высокой точностью совпадает с известным нам. Теперь попробуем рассчитать, что происходило бы при падении уровня моря на 5 и 8 метров в период, так называемой, фанаторийской регрессии [Дикарев, 2011]. Босфорский порог имеет глубину 36 м. Допустим, что поток делится пополам: по $\frac{1}{2}$ вода втекает в Черное море, по $\frac{1}{2}$ – вытекает, т.е. 18 м. приходится на поступающие Средиземноморские воды. При падении уровня на 5 м на поступающие воды останется 13 м, а при падении на 8 м – 10 м. Иными словами, количество поступающих вод должно было бы уменьшиться на 28% и 45% соответственно от современных 176 км^3 . Подставив коэффициенты в уравнение (2) к произведению поступающих вод Средиземного моря мы получим:

$$\text{При падении уровня на 5 м} - \delta^{18}\text{O}_{\text{Чер.м.}} = -2.3002\%$$

$$\text{При падении уровня на 8 м} - \delta^{18}\text{O}_{\text{Чер.м.}} = -2.3003\%$$

т.е. изменение изотопного состава под влиянием ограничения поступления Средиземноморской воды будет составлять ничтожно малую величину $0.2-0.3\%$ за тысячу лет!

Даже если мы будем использовать при расчете не весь объем Черного моря, а 200 метровый слой, подставив соответствующие значения в уравнение (2), мы получим расчетное значение $\delta^{18}\text{O}_{\text{Чер.м.}} = -2.3016\%$. Оно соответствует изменению порядка 1.6% за тысячу лет, хотя и является явно завышенным.

Основной вывод, вытекающий из проделанных нами вычислений, следующий. После соединения Черноморо-Азовского бассейна со Средиземноморским, выравнивания их уровней и установления стабильного водообмена через Босфор, дальнейшие колебания уровня не могли являться причиной изменения изотопного состава воды в бассейне. Основной причиной изменения изотопии воды являлось изменение пресноводной составляющей баланса, т.е. изменение увлажненности климата, а не масштабы поступления Средиземноморских вод. В ходе дальнейшей работы мы попытаемся оценить изменение пресноводной составляющей в изотопном балансе Черноморо-Азовского бассейна в период после климатического оптимума голоцена и провести корреляцию с известными представлениями об изменении уровня моря в этот период.

Литература:

- Ветштейн В.Е. Изотопы кислорода и водорода природных вод СССР. Л.: Недра, 1982. 216 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Черное море. Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 1991. Т. 4. Вып. 1. 429 с.
- Дикарёв В.А. О фанаторийской регрессии Черного моря // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2011. № 1. С. 35–40.
- Николаев С.Д. Изотопная палеогеография внутриконтинентальных морей. М.: Изд-во ВНИРО, 1995. 127 с.
- Николаев С.Д., Гурский Ю.Н., Анисеев В.И. Изотопный состав кислорода иловых вод Черного моря // Новейшие отложения, неотектоника и человек. 1976. Вып. 6. С. 48–53.
- Суходей В.Ф. Моря Мирового океана. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 288 с.
- Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы. М.: Наука, 1983. 277 с.
- Чижова Ю.Н., Добролюбов С.А. и др. Оценка влияния под малых рек на приповерхностные воды Чёрного моря по изотопным данным // Вестн. Моск. Ун-та Сер. 5. География. 2011. № 6.
- Янина Т.А. Неоплейстоцен Понто-Каспия: биостратиграфия, палеогеография, корреляция. М.: Географический факультет МГУ, 2012. 264 с.