

ОТ РЕДАКЦИИ

В 1985 г. в г. Каменец-Подольском состоялся II Всесоюзный симпозиум «Изотопы в гидросфере», организованный Институтом водных проблем АН СССР, Институтом геохимии и физики минералов и Институтом геологических наук УССР при участии ВСЕГИНГЕО.

На симпозиуме было заслушано 159 докладов от 56 научных и производственных организаций АН СССР и других ведомств страны.

Редколлегия журнала «Водные ресурсы» приняла решение опубликовать ряд статей, написанных на основе этих докладов. Представленная ниже подборка из пяти статей — первая часть этой публикации.

УДК 556.02.072

О ФОРМИРОВАНИИ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ЭСТОНИИ

ВАЙКМЯЭ Р. А., ПУННИНГ Я.-М. К., ТООТС М. Д.

С 1976 г. в Институте геологии АН ЭССР проводятся систематические исследования изотопного состава атмосферных осадков, поверхностных и подземных вод с целью выявления взаимосвязей между вариациями $\delta^{18}\text{O}$ в осадках и температурами воздуха, между поверхностными и грунтовыми водами, а также для составления водного баланса озер. Основным районом исследования является восточная Эстония, что обусловлено относительно высоким уровнем гидро- и геологической изученности этого района и интенсивно развивающейся здесь горнодобывающей промышленностью.

Определение изотопного состава кислорода воды проводилось на масс-спектрометрах МИ-1201 [1], а с 1985 г. — на Делта-Е (фирмы Финниган МАТ). Величины $\delta^{18}\text{O}$ выражались относительно международного стандарта V-SMOW. Погрешность измерений на уровне значимости $\pm 2\sigma$ не превышает $\pm 0,05\text{‰}$.

Образцы атмосферных осадков для изотопного анализа отбирались с 1976 по 1982 г. на Коосаском наблюдательном посту 29 УГМС ЭССР. Отбор производился 4—6 раз в месяц со стандартного осадкомера. Начиная с 1982 г. отбирались двухнедельные средние образцы осадков на метеостанции Тийрикоя УГМС ЭССР. Поскольку оба пункта расположены близко (расстояние ~ 40 км), на берегу Чудского озера, в относительно сходных метеорологических условиях (среднесуточные температуры, скорость и направление ветра, относительная влажность воздуха по данным двух станций, хорошо коррелируют с высоким коэффициентом $r = 0,95 \div 0,98$), то для удлинения временных рядов наблюдений можно считать данные по станции Тийрикоя прямым продолжением данных по наблюдательному посту Кооса (табл. 1).

Уравнение регрессии между изотопным составом кислорода атмосферных осадков и температурой воздуха для восточной Эстонии имеет вид

$$\delta^{18}\text{O} = 0,32t - 12,44$$

с коэффициентом корреляции $r = 0,74$. Высокое значение коэффициента корреляции говорит о тесной взаимосвязи между этими параметрами.

На рис. 1 приведены экспериментально найденные многолетние среднемесячные величины $\delta^{18}\text{O}$ и вычисленные по среднемесячным темпера-

Многолетние среднемесячные величины температур воздуха $t_{\text{ср}}$, суммы осадков P и средневзвешенные величины $\delta^{18}\text{O}$ в осадках восточной Эстонии за 1976—1984 гг.

Месяц	$t_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	$P, \text{ мм}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{ср}}, \text{‰}$	Месяц	$t_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	$P, \text{ мм}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{ср}}, \text{‰}$
Январь	—6,1	41,1	—15,5	Август	15,1	80,5	—8,4
Февраль	—8,2	23,9	—15,5	Сентябрь	10,4	51,5	—10,5
Март	—3,8	32,3	—13,1	Октябрь	4,7	61,6	—9,1
Апрель	2,6	35,0	—11,7	Ноябрь	1,2	63,5	—13,2
Май	9,7	57,3	—6,3	Декабрь	—4,4	55,9	—13,9
Июнь	14,3	74,0	—7,9				
Июль	16,2	77,1	—8,4	Год	4,3	653,7	—10,4

турам на основе уравнения регрессии. Как видно на рис. 1, отклонения между ожидаемыми и наблюдаемыми величинами $\delta^{18}\text{O}$ в целом незначительны (за исключением декабрьских осадков). При четко выраженных сезонных колебаниях взвешенная среднегодовая величина $\delta^{18}\text{O}$ в осадках составляет $-10,4\text{‰}$. Годовая амплитуда изменений имеет величину 8‰ , причем средний изотопный состав осадков в летний сезон (с мая по октябрь) составляет $-7,9$, а в зимний (с ноября по апрель) $-13,8\text{‰}$.

Полученные характеристики взаимосвязи изотопного состава осадков с температурой воздуха для Эстонии весьма близки соответствующим показателям для станций Западной и Центральной Европы, находящимся в области транзита влагонесущих воздушных масс с Атлантики в глубь континента [3—6]. По этим данным существует явная тенденция увеличения значений коэффициентов a и r с удалением от берегов Атлантики, т. е. с увеличением континентальности. Для континентальных станций Европы величина a равна в среднем $0,37\text{‰}$ [5]. Изменения величины a для континентальных станций обусловлены не только различной их удаленностью от океана, но и различиями в типах атмосферной циркуляции над разными регионами Европы.

Длинный ряд наблюдений позволил провести анализ отклонений величин $\delta^{18}\text{O}$ в разовых осадках от расчетных в зависимости от синоптической ситуации во время их отбора. Было проанализировано 56 случаев, для каждого из которых были восстановлены траектории движения воздушных масс по картам барической топографии для уровня 70 кПа (700 мб) и количество осажденной воды (табл. 2).

Как показывает проведенный анализ, при вторжении осадконесущих масс северо-западного и западного направлений величины отклонений Δ являются относительно положительными, а при северном и юго-западном направлениях — более отрицательными (количество ситуаций с местными воздушными массами слишком мало для заключений). Обогащение атмосферной влаги тяжелыми изотопами кислорода при западном и северо-западном направлениях вторжения можно объяснить передвижением воздушных масс через Балтийское море и относительной близостью пути континентального переноса.

При вторжении воздушных масс с севера летом происходит нагревание нижних слоев атмосферы во время передвижения через континент, что вызывает дефицит влаги и усиленное испарение и транспирацию. Это в свою очередь ведет к увеличению в атмосферной влаге доли испарившегося изотопно легкого водяного пара.

При юго-западном направлении вторжения воздушных масс изотопный состав зимних осадков существенно обеднен ^{18}O по сравнению с расчетным. Это вызвано постоянным уменьшением влагосодержания воздушных масс (от 10—11 до 7—6 кг/м²), что приводит к непрерывному обеднению осадков тяжелыми изотопами.

Для выявления более надежных взаимосвязей между величинами $\delta^{18}\text{O}$ и направлением проникновения воздушных масс требуется большее количество анализов разовых осадков.

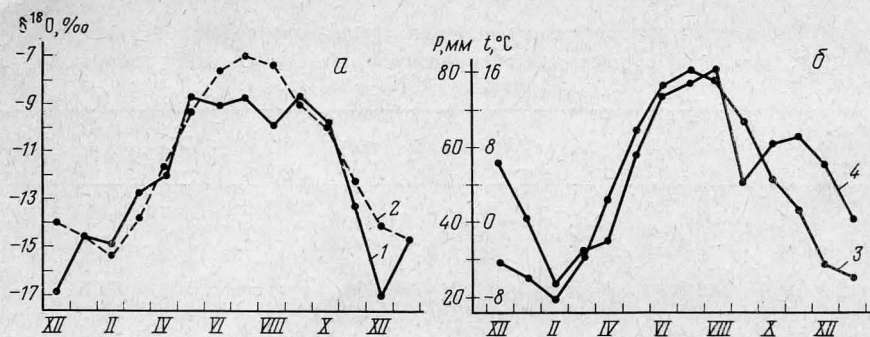


Рис. 1. Внутригодовые изменения изотопного состава кислорода атмосферных осадков (а), температур воздуха и количества осадков (б) над территорией восточной Эстонии

1 — многолетние (1978—1984 гг.) средневзвешенные величины $\delta^{18}\text{O}$ в осадках (экспериментальные); 2 — значения $\delta^{18}\text{O}$, рассчитанные по уравнению зависимости от температуры воздуха; 3 — среднemesячные температуры воздуха; 4 — среднemesячное количество осадков

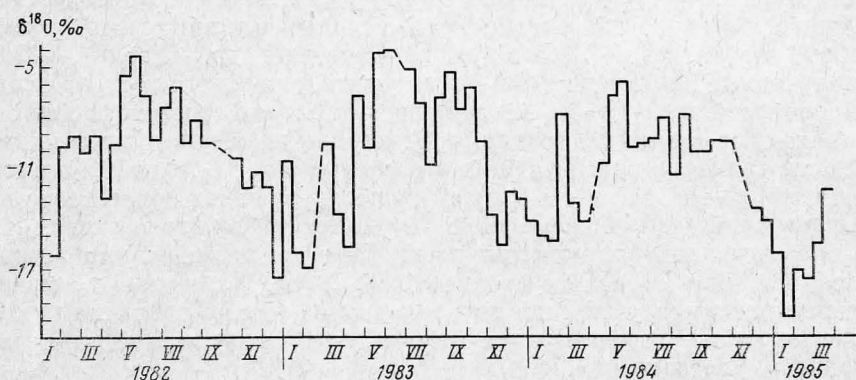


Рис. 2. Вариации $\delta^{18}\text{O}$ в двухнедельных осадках, отобранных на метеостанции Тийриоя

При составлении балансовых моделей между активными звеньями влагообмена наиболее представительными являются изотопные данные по двухнедельным атмосферным осадкам (рис. 2). Параллельно с изучением изотопного состава атмосферных осадков проводились и систематические исследования вариаций $\delta^{18}\text{O}$ в грунтовых водах и в воде ряда рек и озер северо-восточной Эстонии.

Пробы грунтовых вод отбирались в основном из водоносных слоев ордовика и кембрия, залегающих на глубинах от 20 до 122 м на Западно-Кабаласком участке Раквереского фосфоритного месторождения. Величины $\delta^{18}\text{O}$ по всем пробам варьируются в пределах $-11,1 \div -12,7$ при средней величине $-12,0$ ‰. Небольшие вариации в изотопном составе вод разных глубин указывают на хорошее перемешивание вод разных горизонтов.

Величины $\delta^{18}\text{O}$ грунтовых вод на исследуемом участке весьма близки к среднегодовым величинам $\delta^{18}\text{O}$ атмосферных осадков, что свидетельствует о большой роли последних в общем балансе воды. Представления о наличии гидродинамической связи водоносных слоев исследуемого участка подтверждают и результаты анализа трития в водах, который был выполнен во ВСЕГИНГЕО под руководством В. А. Полякова. Оказалось, что даже на глубине 80 м содержание трития в воде составляет 12,3 ТЕ, что указывает на проникновение относительно «молодых» вод на большие глубины. К аналогичным выводам приводят и результаты анализа ^{14}C в водах. Местами наблюдается даже увеличение активности ^{14}C с увеличением глубины опробования.

Средние отклонения наблюдаемых величин $\delta^{18}\text{O}$ в осадках от расчетных Δ и количество осажденной воды W при разных синоптических ситуациях

Направление проникновения воздушных масс	Сезон	Количество ситуаций	Температура воздуха, °C	$\delta^{18}\text{O}$, ‰ (эксп.)	Δ , ‰	W , кг/м ²
Северное	Лето	7	10,4	-12,3	-1,8	9,9
Северо-западное	»	3	15,8	-9,2	-0,2	—
	Зима	5	-8,1	-15,0	0,8	6,4
Западное	Лето	7	11,4	-8,0	2,2	18,9
	Зима	8	0,2	-11,5	1,9	11,6
Юго-западное	Лето	9	12,9	-9,9	-0,1	19,5
	Зима	4	-1,4	-16,2	-2,1	7,6
Южное	Лето	8	14,3	-8,0	1,4	22,3
Местное	»	3	12,9	-11,5	-1,7	16,6
	Зима	2	-8,0	-19,5	-3,7	6,8

В целом результаты изотопного анализа грунтовых вод свидетельствуют об относительно быстрой инфильтрации поверхностных вод до больших глубин и существовании довольно тесной гидродинамической связи между отдельными водоносными слоями. Причиной этого является наличие в рассматриваемой зоне тектонических нарушений и карстовых понор, а также большое количество скважин, пробуренных в ходе геологосъемочных работ.

Изотопный состав воды в ряде рек, впадающих в Финский и Рижский заливы Балтийского моря и Чудское озеро, в зимнее время весьма близок к изотопному составу грунтовых вод ($\delta^{18}\text{O} = -11,3 \div -11,8\text{‰}$). В апреле, после таяния снежного покрова, величины $\delta^{18}\text{O}$ воды уменьшаются, достигая значений $-12,0 \div -12,5\text{‰}$. В летне-осенний период в соответствии с прибавлением изотопно тяжелых атмосферных осадков величины $\delta^{18}\text{O}$ в речных водах достигают значений $-10,1 \div -10,8\text{‰}$. Изотопный состав вод в реках и каналах, используемых в качестве водотоков грунтовых вод, откачанных из шахт по добыче горючих сланцев, почти не зависит от сезона и весь год весьма близок к изотопному составу грунтовых вод ($-11,1 \div -12,4\text{‰}$).

Небольшие вариации $\delta^{18}\text{O}$ в водах рек в течение года и близость их средних значений к изотопному составу грунтовых вод свидетельствуют о том, что основным источником питания исследуемых рек являются грунтовые воды. В природных условиях Эстонии вода верхних водоносных горизонтов формируется за счет современных атмосферных осадков [2]. Поэтому изотопный состав речной воды отражает в первом приближении среднегодовой изотопный состав атмосферных осадков.

Более сложным является механизм формирования изотопного состава вод озер. По гидрологическому режиму исследуемые озера можно разделить на две группы: проточные и замкнутые. В проточных озерах сезонные изменения изотопного состава в общих чертах аналогичны ритмичности изменений в водах рек. В зависимости от морфометрических характеристик и динамики водообмена озер на изотопном составе их вод сильнее или слабее сказывается фракционирование изотопов в процессе испарения, из-за чего величины $\delta^{18}\text{O}$ в озерной воде в летне-осенний сезон могут достигать значений, на 3‰ больших, чем в воде впадающих рек.

Сезонные вариации $\delta^{18}\text{O}$ в воде непроточных озер, а также изменения изотопного состава в вертикальных профилях их вод позволяют проводить балансовые расчеты и уточнять значения природного фактора фракционирования при фазовых переходах воды.

Исследованные замкнутые озера по изотопному составу кислорода можно разделить на три группы (табл. 3). В первой значения $\delta^{18}\text{O}$ вод весной под ледяным покровом и непосредственно после его разрушения весьма близки к изотопному составу речных вод. Это говорит о том, что в зимний сезон за счет грунтового питания вода в них полностью сменилась и приобрела изотопный состав, который близок к изотопному составу

Средние величины $\delta^{18}\text{O}$ в водах некоторых озер восточной Эстонии

Озеро	$\delta^{18}\text{O}$, ‰, по периодам		Озеро	$\delta^{18}\text{O}$, ‰, по периодам	
	апрель-май	август-сентябрь		апрель-май	август-сентябрь
Карьера	—11,0	—10,7	Вийтна	—6,9	—3,6
Юмарярв	—11,2	—10,1	Мартиска	—6,9	—5,7
Панньярв	—11,0	—7,8	Валгеярв	—6,5	—
Рякярв	—10,7	—6,6	Хаугярв	—5,8	—4,1
Ряятсма	—8,5	—5,7	Курадиярв	—5,7	—4,9
Яала	—7,8	—7,2			

ву грунтовых вод. Для таких озер характерна и определенная изотопная стратификация: придонные слои воды имеют более отрицательный изотопный состав. В зависимости от скорости перемешивания, отношения площади поверхности к объему воды и интенсивности питания грунтовыми водами изотопный состав слоя поверхностной воды в этих озерах может варьироваться в больших пределах.

При уменьшении доли грунтовых вод в общем балансе воды озера концентрация ^{18}O в его воде ранней весной увеличивается. Так, в озерах второй группы Ряятсма и Яала, несомненно, определенную роль играет родниковое питание, но оно довольно ограничено и не ведет к полному возобновлению воды.

Озера третьей группы по изотопному составу воды резко отличаются от предыдущих. Для них характерны высокие средние величины $\delta^{18}\text{O}$ как для осеннего, так и зимнего и ранневесеннего сезонов. В зависимости от гидрологического режима озер и интенсивности испарения величины $\delta^{18}\text{O}$ в поверхностном слое вод в течение лета и осени могут приобретать значения вплоть до $-3 \div -4\text{‰}$. Из-за прибавления позднесенних атмосферных осадков и уменьшения интенсивности испарения к зиме изотопный состав становится несколько легче, но не достигает значения -7‰ . В зимний период в этих озерах отсутствует изотопная стратификация, а ранней весной вода поверхностных слоев может иметь несколько более отрицательные значения $\delta^{18}\text{O}$, что обусловлено таянием ледяного покрова. В общем балансе воды оз. Вийтна, возможно, определенное значение имеет грунтовое питание. Поводом для такого предположения является большое различие ($3,3\text{‰}$) в изотопном составе вод в осенний и весенний сезоны, а также результаты исследования одного зимнего вертикального профиля, согласно которому величина $\delta^{18}\text{O}$ в придонных слоях воды оказалась более отрицательной, чем в верхних.

Литература

1. Вайкмяэ Р. А. Методические основы масс-спектрометрического анализа вариаций $\delta^{18}\text{O}$ в ледниках.— М., 1984.— 40 с. Деп. в ВИНТИ № 7280—84.
2. Валлер Л. К. Геогидродинамическое районирование и баланс подземных вод Эстонии//Проблемы гидрогеологии Эстонии.— Таллин: Изд-во АН ЭССР. 1979. с. 11—119.
3. Ферронский В. И., Поляков В. А. Изотопия гидросферы.— М.: Наука, 1983.— 280 с.
4. Mook W. G. Stable carbon and oxygen isotopes of natural waters in the Netherlands// Isotope Hydrology Proc. Vienna: IAEA, 1970. P. 163—190.
5. Rozanski K. Temporal and spatial variations of deuterium and oxygen-18 in European precipitation and groundwaters//ZfI-Mitteilungen. 1984. № 85. S. 341—353.
6. Rozanski K., Sonntag C., Münnich K. O. Factors controlling stable isotope composition of European precipitation//Tellus. 1982. V. 34. № 2. P. 142—150.

Институт геологии
АН ЭССР

Поступила в редакцию
5.XI.1985