

метеорологических процессов // Известия Русского географического общества. 2012. Т. 144. Вып. 3. – С. 3–12.

5. Румянцев В.А., Трапезников Ю.А. Короткопериодные климатические циклы гидрометеорологических процессов // Вода и водные ресурсы: системообразующие функции в природе и экономике. Сборник научных трудов Всерос. науч. конф., 23–28 июля 2012 г., г. Цимлянск. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2012. – С. 117–122.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА И ЕГО ПРИТОКОВ С ПОМОЩЬЮ ИЗОТОПНЫХ ИНДИКАТОРОВ

Румянцев В.А.¹, Рыбакин В.Н.¹, Токарев И.В.²

¹Институт озероведения РАН, г. Санкт-Петербург

²Научный парк Санкт-Петербургского государственного университета,

Ресурсный центр «Геомодель», г. Санкт-Петербург

v.n.rybakin@gmail.com

Ладожское озеро, крупнейший пресноводный водоем Европы, имеет важное экономическое значение для северо-западного региона Российской Федерации, являясь транспортной артерией, источником водоснабжения (через р. Неву), рыбопромысловым и рекреационным объектом. Соответственно, принципиальным оказывается построение такого механизма управления водными и биологическими ресурсами в бассейне озера, который учитывал бы состояние водоема, включая процессы, протекающие в нем самом и притоках.

Широкий спектр работ зарубежных групп исследователей указывает на высокую эффективность подходов, базирующихся на исследовании водных объектов с помощью изотопных методов [1–4], однако в России эти методы пока слабо освоены. Наше исследование основывается на использовании информации о глобальных изотопных трассерах (environmental isotopes) для количественной оценки условий формирования водного баланса и качества воды в Ладожском озере.

В данной публикации представлены промежуточные результаты первого этапа работ, включающего изучение водного баланса Ладожского озера по изотопному составу воды (содержаниям дейтерия – $\delta^2\text{H}$ и кислорода-18 – $\delta^{18}\text{O}$). Полученные в 2012–2014 гг. данные отражают вариации изотопного состава воды в озере и его притоках, а также средний подекадный (за каждые 10 дней) изотоп-

ный состав осадков в указанный период. Для количественных оценок проведены опыты по влиянию испарения на изотопный состав воды, снеговая съемка и небольшой объем наблюдений на озерах Карельского перешейка. Всего выполнено около 350 измерений изотопного состава воды, которые, как правило, сопровождались изучением химического состава воды, а также исследованием гранулометрического и химического состава взвесей.

Сводка результатов по изотопному составу воды различных исследованных объектов представлена на рис. 1. Из диаграммы $\delta^2\text{H} \div \delta^{18}\text{O}$ (рис. 1) следует, что в изучаемом районе изотопный состав атмосферных осадков 2012–2014 г. вполне соответствуют глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) классическое уравнение которой имеет вид [5]:

$$\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10,$$

и которая будет использоваться в дальнейших рассуждениях.

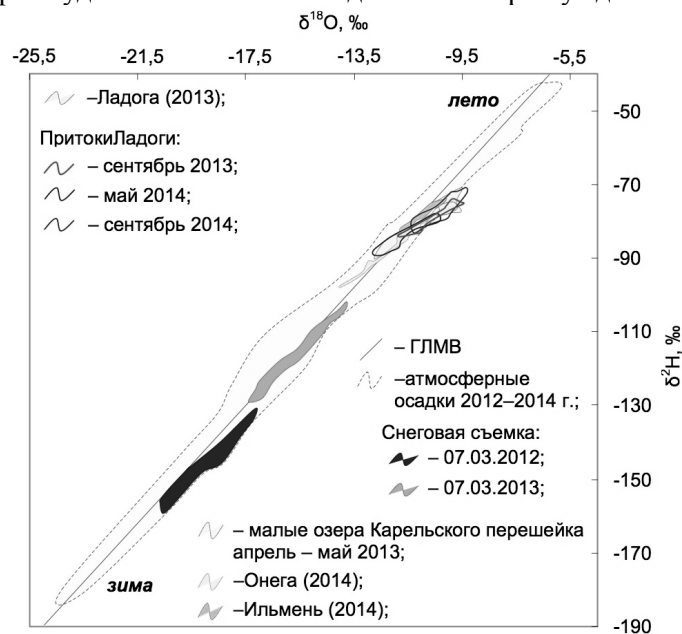


Рис. 1 – Изотопный состав атмосферных осадков и поверхностных вод в бассейне Ладожского озера. Пунктирная область – изотопный состав атмосферных осадков (станции наблюдения «Петергоф» и «Ламмин-Суо»), подписи «лето» «зима» около этой области означают состав летних и зимних осадков; ГЛМВ – глобальная линия метеорных вод

Разброс изотопного состава осадков вдоль ГЛМВ обусловлен закономерным и наблюдаемым повсеместно облегчением¹⁸ их состава в холодный период года и утяжелением – в теплый. В рассматриваемом случае наиболее изотопически легкие (зимние) осадки имеют $\delta^{18}\text{O} = -23,5\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -181\text{‰}$, а наиболее изотопически тяжелые (летние) – $\delta^{18}\text{O} = -5,9\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -44\text{‰}$, если принимать во внимание отдельные измерения.

Из диаграммы $\delta^2\text{H} \div \delta^{18}\text{O}$ видно, что изотопный состав воды во всех исследованных поверхностных водных объектах варьирует в существенно меньших пределах, чем в атмосферных осадках. Это означает, что на поверхности водосбора и в водоемах имеет место значительное осреднение (перемешивание) осадков, выпадающих в холодный и теплый период года.

Отметим, что начальное осреднение происходит уже в ходе выпадения твердых осадков, на что указывают данные снеговых съемок 2012 и 2013 г., разброс изотопных составов для которых существенно меньше, чем для отдельных снегопадов (рис. 1). Дальнейшее осреднение имеет место в процессе руслового стока, регулируемого емкостью малых озер и болот, а также, возможно, – подземным стоком. Наиболее сильное выравнивание изотопного состава воды, естественно, наблюдается в Ладожском озере, время пребывания воды в котором достаточно велико, а само озеро на значительной части акватории является димектическим.

Анализ полученных результатов указывает на то, что Ладожское озеро является, в целом, хорошо перемешанным резервуаром, на баланс которого значительное влияние оказывает испарение воды на водосборе и с зеркала водоема. Исходя из экспериментов, потери воды на испарение оцениваются величиной около 17 % (см. рис. 2).

Наблюдения за притоками позволяют уверенно идентифицировать волну снеготалого стока, а также проследить изменения изотопного состава в годовом разрезе времени. По изотопному составу

¹⁸ Под термином «облегчение» изотопного состава подразумевается появление отрицательных величин $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ с большим значением, связанных с уменьшением содержания дейтерия и кислорода-18 и обусловленных действием изотопного фракционирования. Под «утяжелением» понимается обратный процесс.

воды обнаружены существенные различия в условиях питания притоков Ладожского озера (рис. 3).

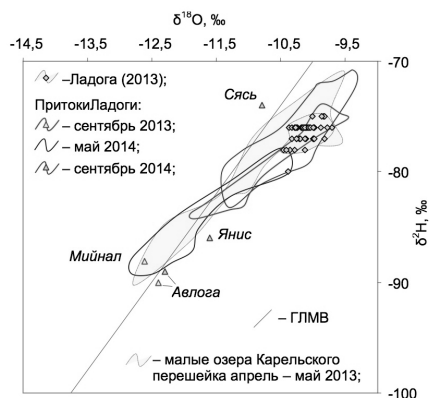


Рис.2 – Расчет испарения по результатам экспериментов и исследованиям изотопного состава воды в бассейне Ладожского озера

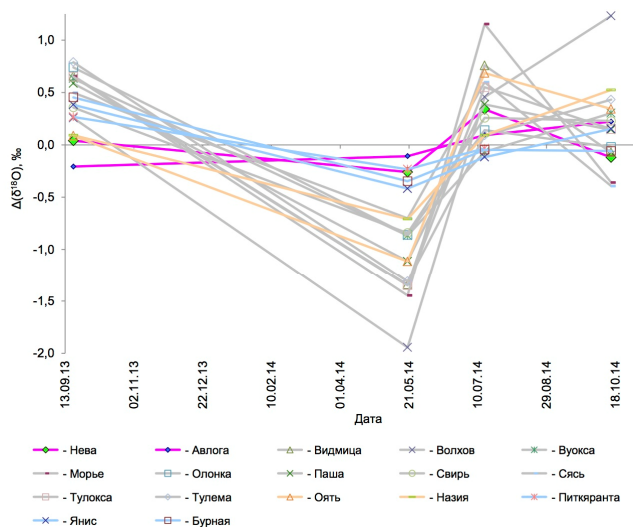


Рис.3 – Вариации изотопного состава кислорода во времени в реках-притоках Ладожского озера (приведены в абсолютных значениях $\delta^{18}\text{O}$ относительно среднего $\Delta(\delta^{18}\text{O})$ для каждой точки наблюдения)

В частности, р. Волхов характеризуется максимальным размахом вариаций $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$, для которого $\Delta(\delta^{18}\text{O}) = 3,2 \text{ ‰}$, а также р. Морье $\Delta(\delta^{18}\text{O}) = 2,6 \text{ ‰}$. Наименьший размах изотопных составов,

как и ожидалось, имеет р. Нева $\Delta(\delta^{18}\text{O}) = 0,6 \text{ ‰}$. Река Авлога демонстрирует аномальный (для малой реки) ход изменения изотопного состава воды, который, с одной стороны, является самым легким из измеренных, а с другой – почти не изменяется во времени, лишь слегка утяжеляясь $\Delta(\delta^{18}\text{O}) = 0,4 \text{ ‰}$. Относительно малые изменения состава отмечены также в реках Бурная – $\Delta(\delta^{18}\text{O}) = 0,8 \text{ ‰}$, Питкяранта – $\Delta(\delta^{18}\text{O}) = 0,5 \text{ ‰}$ и Янис – $\Delta(\delta^{18}\text{O}) = 0,8 \text{ ‰}$. Реки Назия и Оять, имеют размах вариаций изотопного состава сопоставимый с основной массой опробованных притоков ($\Delta(\delta^{18}\text{O}) = 1,2 \text{ ‰}$ и $\Delta(\delta^{18}\text{O}) = 1,8 \text{ ‰}$, соответственно), однако ход изменений их состава имеет характер, несколько отличающийся от общего.

Указанные вариации изотопного состава в реках интерпретируется как относительно низкая доля подземного питания в р. Волхов, а также всего бассейна оз. Ильмень. Напротив, р. Авлога (Карельский перешеек) в области перехода от осадочного чехла к Балтийскому кристаллическому щиту, характеризующаяся почти постоянными величинами $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$, имеет существенную долю подземного питания. Река Свирь имеет промежуточный размах вариаций, что связано с зарегулированностью ее стока Онежским озером. Река Нева имеет мало меняющийся во времени изотопный состав воды, вариации которого совпадают с вариациями средних составов воды в Ладожском озере.

Данные о динамике изменения изотопного состава воды предполагается использовать для верификации и калибровки математической модели циркуляции и формирования качества воды в Ладожском озере.

Литература

1. Ферронский В.И., Дубинчук В.Т., Поляков В.А., Селецкий Ю.Б., Куцов В.М., Якубовский А.В. Природные изотопы гидросферы. – М.: Недра, 1975. 280 с.
2. Изотопия природных вод. /Отв. ред. Ферронский В.И. – М.: Наука, 1978. 246 с.
3. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. – М.: Научный мир, 2009. 632 с.
4. Leibundgut C., Maloszewski P., Kull C. Tracers in Hydrology. Wiley-Blackwell. Singapore. 2009, 441 p.
5. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. Science, 1961, v. 133, No 3464, p. 1702-1703.