УДК 551.464.6.027:551.481.1(571.54)

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ЖИДКОЙ И ТВЕРДЫХ ФАЗ ВОДЫ ОЗЕРА ДОРОНИНСКОЕ (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ) В СВЯЗИ С ОБРАЗОВАНИЕМ СОЛЕЙ НА ЕГО ЛЬДУ

Замана Л.В.

ФГБУН «Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН», Чита,
e-mail: l.v.zamana@mail.ru

По данным изучения изотопного состава льда, воды и ее конденсата, собранного над ледяным покровом, сделан вывод о миграции воды через лед к дневной поверхности и отложения солей на льду в результате ее испарения.

Ключевые слова: лед, подледная вода, конденсат, изотопный состав, фракционирование изотопов, испарение воды, отложение солей.

ISOTOPIC COMPOSITION OF THE LIQUID AND SOLID PHASES WATER LAKE DORONINSKOE (EASTERN TRANSBAIKALIA) IN CONNECTION WITH THE FORMATION OF SALTS AT ITS ICE

Zamana L.V.

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS (INREC SB RAS), Chita,
e-mail: l.v.zamana@mail.ru

According to the study of the isotopic composition of ice, water and condensate collected over ice, the conclusion is made about the migration of water through the ice to the surface and the salt deposits on the ice as a result of evaporation.

Keywords: ice, ice water, condensate, isotopic composition, isotopes fractionation, evaporation, deposition of salts.

Введение

Изучение изотопов воды в различных ее фазовых состояниях широко используется при исследованиях природных процессов в живой и неживой природе. При переходах воды в пар и лед происходит разделение изотопов водорода и кислорода, при этом вода при испарении обогащается тяжелыми изотопами, а при замерзании, напротив, становится изотопически более легкой, утяжеляется лед. Одним из объектов изотопных исследований было оз. Доронинское (51°14’08» с.ш., 112°13’59» в.д., абс. высота 780 м) – меромиктический (расслоенный по физико-химическим характеристикам водной толщи) содовый водоем в Восточном Забайкалье, привлекший в последнее десятилетие внимание специалистов разных профилей [2-6, 9 и др.]. Одна из его особенностей – отложение солей на поверхности ледяного покрова, наблюдающееся нередко в начале зимы в бесснежные периоды, образование которых исследователи объясняют испарением льда [8 и др.]. Как показали наши наблюдения по выставленным меткам, лед в это время не испаряется (дневные температуры –15-25°С, ночные до –30-35°С), незначительное испарение его возможно только при высокой инсоляции в весеннее время (март-апрель).

Целью настоящего исследования было выяснение особенностей фракционирования изотопов воды при ее фазовых переходах на водоеме специфического химического типа и возможности использования полученных изотопных данных для выяснения источника солевых отложений на льду озера.

Материалы и методы исследований

Озеро Доронинское находится в семиаридной зоне, бессточное, глубина его на период отбора проб не превышала 5.5 м, площадь акватории около 5 км^2. Среднегодовое количество осадков в районе около 340 мм, испарение с водной поверхности озер для данных ландшафтно-климатических условий оценивается расчетным методом в 450-500 мм, а в зимний период с поверхности льда – 110-120 мм [1]. Локализовано озеро в межгорной впадине, выполненной терригенными отложениями мезозоя, перекрытыми незначительными по мощности четвертичными озерно-аллювиальными осадками. Водное питание озеро получает за счет атмосферных осадков, поверхностных и подземных вод, расходные статьи водного баланса представлены исключительно испарением. Соленость воды по сезонам года и в межгодовой динамике в последнее десятилетие изменялась в пределах 15.8-36.2 г/л в верхнем слое и 28.0-35.5 г/л – в нижнем. Обусловлена она испарительным концентрированием питающих озеро пресных вод, а состав воды – выпадением солей по мере насыщения рапы по определенным минералам (карбонатам, вторичным алюмосиликатам, сульфидам) и внутриводоемными гидробиологическими процессами, в особенности продуцированием и минерализацией органического вещества и сульфатредукцией [2, 4, 5 и др.].

Для изотопного анализа кроме проб воды и льда отобраны также собранный особым образом конденсат и снег. Конденсат (иней) собирали с помощью ловушки (рис. 1), установленной на лед примерно в центре озера в конце декабря 2010 г. Она представляла собой обтянутый полиэтиленовой пленкой каркас высотой 15 см. При установке пленка с боковых поверхностей плотно прижимались ко льду для изоляции от наружного воздуха. Рядом установили такую же ловушку, но лед в ней перекрыли пленкой. Снег на поверхности льда в это время отсутствовал, снежный покров образовался позже. В ловушке с открытым льдом сразу же после ее установки пленка начала покрываться конденсатом, теряя прозрачность. В ловушке с перекрытым льдом конденсат за все время не образовался, пленка осталась прозрачной. Все вместе это указывает на конденсацию не паров воздуха, а влаги, поступавшей с поверхности льда. Основная проба конденсата, кристаллы которого свисали с пленки в виде покрывающих всю ее поверхность друз высотой до 5 см, из-за опасения обрушения и прямого контакта со льдом была отобрана 03 февраля 2011 г., все остальные пробы – 21 февраля. За время между отборами проб образовалось незначительное количество конденсата, из-за чего по второй его пробе выполнены только изотопные определения.

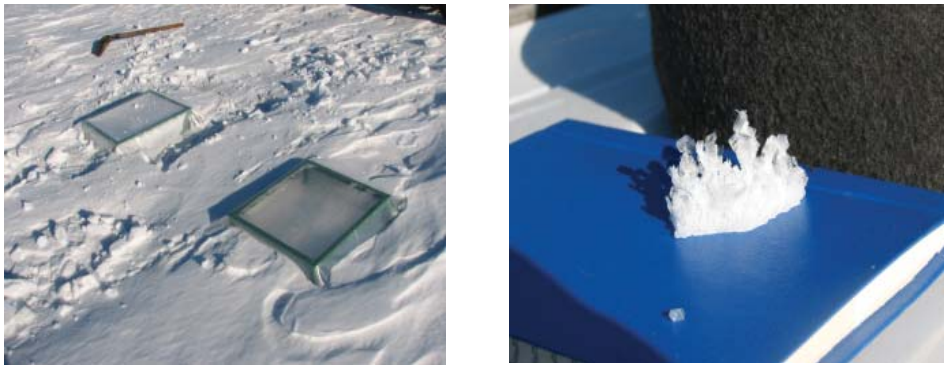

Рис. 1. Ловушки для сбора конденсата и его «друза»

Изотопные исследования проведены в Аналитическом центре Дальневосточного геологического института ДВО РАН на масс-спектрометре Finnigan-MAT 252 (Германия). Рабочий внутрилабораторный стандарт калибровался по международным стандартам VSMOW, SLAP и GISP. Изотопный состав рассчитан по стандарту океанической воды (SMOW). Погрешность анализа 1σ по кислороду ±0,15 ‰ и по водороду ±1,2 ‰. Физико-химические исследования проб воды, льда, конденсата и снега проведены в сертифицированной лаборатории Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН.

Результаты и их обсуждение

Изотопный состав воды оз. Доронинское (таблица) характеризуется существенным утяжелением по дейтерию (D) и кислороду ^{18}O по сравнению с атмосферными осадками, что видно по приведенному составу снега.

Таблица

Некоторые физико-химические и изотопные характеристики воды и ее твердофазных состояний на оз. Доронинском

Номер пробы	Тип и место отбора проб	pH	M, мг/л	$\delta^{18}O$, ‰	δD, ‰	d_{exc}, ‰
ДО-11-02-2с	Снег на льду	9.86	2067	-25.7	-205.8	-0.2
ДО-11-02-2э-1	Конденсат в ловушке	7.94	37.7	-6.7	-62.5	-8.9
ДО-11-02-2э-2	–“–	-	-	-3.9	-51.8	-20.6
ДО-11-02-2л-1	Лед, интервал 0-10 см	10.02	3836	-1.3	-35.7	-25.3
ДО-11-02-2л-4	–“– 30-40 см	10.09	6075	-1.6	-36.8	-24.0
ДО-11-02-2л-7	–“– 60-70 см	10.08	6083	-1.5	-35.4	-23.4
ДО-11-02-2л-10	–“– 90-100 см	10.11	5435	-2.2	-40.2	-22.6
ДО-11-02-2л-12	–“– 110-120 см	10.08	3211	-2.3	-43.3	-24.9
ДО-11-04-2-0	Вода в лунке (с глубины 0.1 м)	10.02	31966	-5.9	-57.4	-10.2
ДО-11-02-2-2	Вода с глубины 2.0 м	9.97	33492	-6.6	-58.3	-5.5
ДО-11-02-2-3	–“– с 3.0 м	9.97	33389	-6.4	-55.6	-4.4
ДО-11-02-2-4	–“– с 4.0 м	9.99	33715	-4.7	-54.7	-17.1
ДО-11-02-2-5	–“– с 5.0 м	9.99	33926	-6.1	-53.4	-4.6
ДО-11-02-2-6	–“– с 5.2 м	-	-	-6,2	-54,5	-4.9

Примечание. М – минерализация по сумме катионов и анионов; прочерк – не определяли

Отклонение точек на диаграмме (рис. 2) от Глобальной линии метеорных вод [12] соответствует испаряющимся бассейнам [11] и подтверждает определяющую роль процесса испарения в обогащении озерной воды тяжелыми изотопами. Состав снега, напротив, практически приходится на эту линию, дейтериевый эксцесс (d_{exc}), который находят по уравнению $d_{exc} = \delta D - 8\delta^{18}O$ [13], близок к нулю. В распределении по вертикали по ^{18}O выделяется проба с глубины 4 м. Чаще всего примерно здесь находится хемоклин, разграничивающий разные по гидрохимическим показателям водные слои, но в этот раз расслоенность, как видно по минерализации воды, проявлена не была. Причина наблюдающегося достоверного утяжеления воды по кислороду неясна.

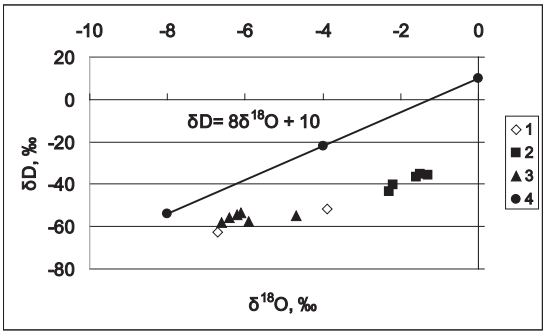

Рис. 2. Положение конденсата (1), льда (2) и воды (3) по пробам с оз. Доронинское на диаграмме $\delta^{18}O - \delta D$; 4 – фигуративные точки Глобальной линии метеорных вод (уравнение ее представлено на рис.)

Лед, как отмечено выше, при замерзании воды обогащается тяжелыми изотопами водорода и кислорода, чему соответствуют и полученные нами данные. Зарубежными авторами в результате прецизионных измерений было найдено, что при нулевой скорости промерзания «чистой» воды равновесные коэффициенты фракционирования а в системе лед-вода при 0°С по дейтерию и кислороду-18 равны соответственно 1.0212 и 1.00291 [14]. При этом установлено прямолинейное уменьшение а с увеличением скорости промерзания и сохранение равновесных условий фракционирования при скорости промерзания до 2 мм/час. Скорость нарастания льда на водоемах Забайкалья не превышает 1 мм/час, что обеспечивает условия для равновесного, следовательно, максимального разделении изотопов Н и О между водой и льдом на озерах региона. Равновесным считается фракционирование изотопов и при образовании морского льда [11]. Как правило, начало ледостава на водоемах лесостепной и степной зон Забайкалья приходится на сухой период, в этих условиях разница в изотопных характеристиках воды и льда определяется практически только межфазовым фракционированием. В отличие, к примеру, от озер на побережье Белого моря, где из-за выпадения снега на водную поверхность лед по изотопному составу оказался легче замерзающей воды [7], в нашем случае изотопные соотношения воды и льда соответствуют теоретическим закономерностям.

По изотопному составу заметно различие между верхним и нижним слоями льда (табл.). Оно отражает изменение изотопных характеристик воды при нарастании ледяного покрова. В начальный период замерзания водоема вода более тяжелая, затем вследствие разделения изотопов между льдом и водой в подледном слое она становится более легкой, соответственно намерзающий снизу лед по изотопному составу также более легкий. Нижний слой льда (с глубины 90 см) оказался, тем не менее, тяжелее среднего по водной толще на 13.90 ‰ по D и 3.75 ‰ по ^{18}O или по величине а на 1.0139 и 1.00375 соответственно. Величина а по водороду, таким образом, меньше, а по кислороду больше значения, указанного в [14]. Поскольку разделение изотопов происходило в равновесных условиях, такая разница вызвана, очевидно, влиянием на это разделение физико-химических характеристик воды, в особенности величины pH. Хотя автор работы [15] пришел к заключению, что растворенные соли влияют только на температуру замерзания воды, наши данные свидетельствуют о необходимости уточнения этих представлений, как это произошло в отношении указанного им же коэффициента фракционирования по водороду, равного, по его определениям, 1.0192.

Изотопный состав конденсата первой пробы близок к подледной воде, по второй пробе имеет промежуточные характеристики между льдом и водой. Остановимся особо на первом случае. Он свидетельствует, по нашему мнению, об образовании конденсата в результате испарения мигрирующей к поверхности льда подледной воды. Возможность движения воды в ледяном покрове обеспечивается его пористостью, которая оценивается в 0.5-1.0 % [6] и имеет не только изолированные, но и сообщающиеся поры. Движущим механизмом восходящей миграции должно служить всасывающее давление надледного слоя атмосферы из-

за дефицита насыщения ее водяным паром. В зимние месяцы средняя относительная влажность воздуха, по данным ближайшей метеостанции (в 50 км), составляет 64–70 %, а недостаток насыщения – 0.5–0.7 мб при упругости водяного пара 0.9–1.2 мб [10]. Аналогично происходит испарение почвенной влаги и залегающих неглубоко грунтовых вод, чем вызвано широкое развитие засоленных земель в засушливых районах. Более тяжелый изотопный состав по второй пробе конденсата можно объяснить некоторым участием в его образовании испаряющегося льда. Подтверждением этого служит небольшое изотопное утяжеление льда в пробе с верхнего интервала (табл.), что возможно вследствие перехода изо льда в паровую фазу более легких изотопов. При этом слабый изотопный эффект может быть обусловлен как незначительным испарением, так и неравновесным фракционированием в системе пар–лед.

При испарении воды пар резко опресняется, минерализация конденсата по сравнению с водой уменьшилась на два порядка (табл.). При отсутствии снега это приводит к отложению солей на поверхности льда (по-местному – «гуджир»), а при наличии снегового покрова солевые компоненты задерживаются в нем, на что указывает высокая соленость снега.

Заключение

Таким образом, приведенные изотопные данные показывают, что источником сконденсированной надо льдом влаги служит подледная вода. Миграция ее через лед обеспечивается пористостью льда и происходит вследствие дефицита насыщения паров воздуха над его поверхностью. Источником солевых образований на поверхности льда является, следовательно, не лед, испарение которого незначительно, а подледная вода.

Исследования выполнены при поддержке проекта СО РАН «Роль ледяных покровов в сезонных гидрогеохимических и гидробиологических циклах малых соленых и пресных озер Забайкалья».

Список литературы

1. Асеев В.В. Региональная оценка ресурсов испарения с поверхности малых водоемов юга Восточной Сибири // Географический анализ природных ресурсов Иркутской области. – Иркутск, 1985. – С. 22-39.

2. Борзенко С.В., Замана Л.В., Букаты М.Б. Сезонные и межгодовые изменения химического состава и минеральных равновесий содового озера Доронинское (Забайкалье) // Гидрогеохимия осадочных бассейнов: Труды Российской научной конференции. – Томск, Изд-во НТЛ, 2007. – С. 235-239.

3. Горленко В.М., Бурюкаев С.П., Матюгина Е.Б., Борзенко С.В., Намсараев З.Б., Брянцева И.А., Болдарева Е.Н., Сорокин Д.Ю., Намсараев Б.Б. Микробные сообщества стратифицированного содового озера Доронинского (Забайкалье) // Микробиология. – 2010. – Т. 79, № 3. – С. 410-421.

4. Замана Л.В. Формирование и трансформация химического состава вод минеральных озер (на примере Забайкалья) // Докл. АН. – 2009. – Т. 428, № 3. – С. 382-385.

5. Замана Л.В., Борзенко С.В. Сероводород и другие восстановленные формы серы в кислородной воде озера Доронинское (Восточное Забайкалье) // Докл. АН. – 2007. – Т. 417, № 2. – С. 232-235.

6. Замана Л.В., Бордонский Г.С., Борзенко С.В., Гурулев А.А., Крылов С.Д., Цыренжапов С.В. Кремний в ледяном покрове озер Забайкалья // Докл. АН. – 2005. – Т. 401, № 2. – С. 248-251.

7. Лисицын А.П., Васильчук Ю.К., Шевченко В.П., Буданцева Н.А.,. Краснова Е.Д, Пантюлин А.Н., Филиппов А.С., Чижова Ю.Н. Изотопно-кислородный состав воды и снежно-ледяного покрова отделяющихся водоемов на разных стадиях изоляции от Белого моря // Докл. АН. – 2013. – Т. 449, № 4. – С. 467-473.

8. Минеральные воды южной части Восточной Сибири. Т. I. Гидрогеология минеральных вод и их народнохозяйственное значение / под ред. В.Г. Ткачук и Н.И. Толстихина. – М.-Л., Изд-во АН СССР, 1961. – 346 с.

9. Склярова О.А., Скляров Е.В., Меньшагин Ю.В. Концентрирование микроэлементов в малых озерах Ингодинской впадины (Читинская область, Россия) // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53, № 12. – С.1722-1734.

10. Справочник по климату СССР. Вып. 23. Бурятская АССР и Читинская область. Ч. IV. Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров. – Л., Гидрометеоиздат, 1978. – 328 с.

11. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопы гидросферы Земли. – М., Научный мир, 2009. – 632 с.

12. Craig H. Isotopic variations in meteoritic waters // Science. – 1961. – V. 133. – P. 1702-1703.

13. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. – 1965. – V. 16 (4). – P. 436-468.

14. Lehmann M., Siegenthaler U. Equilibrium oxygen- and hydrogen-isotope fractionation between ice and water // J. Glaciol. – 1991. – V. 38, № 125. – P. 23-26.

15. Weston Jr.R.E. Hydrogen isotope fractionation between ice and water // Geochimica et Cosmochimica acta. – 1955. – Vol. 8, Iss. 5-6. – P. 281-284.