

УДК [556.55.012:502.175](282.247.212)

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

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОД ПРИТОКОВ И ПОДЗЕМНЫХ
ВОД В ЛАДОЖСКОМ ОЗЕРЕ ПО ДАННЫМ ИЗОТОПНЫХ
ИНДИКАТОРОВ**

ФГБУН «Институт озераведения Российской академии наук» (ИНОЗ РАН),
v.n.rybakin@gmail.com

V.A. Rumyantsev, V.N. Rybakin, I.V. Tokarev

**DISTRIBUTION OF WATERS OF INFLOWS
AND UNDERGROUND WATERS IN LAKE LADOGA
ACCORDING TO ISOTOPE INDICATORS**

Данная статья посвящена изучению условий формирования баланса и динамики водных масс бассейна и акватории Ладожского озера с помощью стабильных изотопных трассеров – дейтерия ($\delta^2\text{H}$) и кислорода-18 ($\delta^{18}\text{O}$). Показано, что данные о $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ однозначно диагностируют потери воды на испарение, которые составляют в среднем около 18 %. В водной толще северной ванны фиксируется аномалия облегчения состава кислорода, происхождение которой авторы связывают с субаквальной разгрузкой подземных вод из рифейских отложений. Полученные результаты доказывают перспективность внесения изотопного опробования в состав исследовательских работ в бассейне Ладожского озера. Наличие индивидуальных особенностей в пространственном и временном распределении содержаний дейтерия и кислорода-18 в притоках, озере и подземных водах позволяет обоснованно предполагать, что эти данные могут быть использованы при построении математических моделей соответствующих водных объектов.

Ключевые слова: стабильные изотопные трассеры, дейтерий, кислород-18, притоки и водная толща Ладожского озера, испарение, атмосферные осадки, подземные воды.

This article is devoted to the study of the conditions for the formation of the balance and dynamics of the water masses of the basin and the water area of the Ladoga Lake with the help of stable isotope tracers – deuterium ($\delta^2\text{H}$) and oxygen-18 ($\delta^{18}\text{O}$). According to the data on $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$, the effect of evaporation is unambiguously diagnosed, the calculation gives water loss by evaporation, on average, about 18 %. In the water column of the northern bath, an anomaly is established to facilitate the composition of oxygen, the origin of which the authors associate with subaquatic discharge of groundwater from the Riphean sediments. The obtained results prove the prospects of introducing isotope testing into the research work in the basin of the Ladoga Lake. The presence of individual features in the spatial and temporal distribution of the deuterium and oxygen-18 contents in tributaries, the lake and underground waters allows us to reasonably assume that these data can be used in constructing mathematical models of the corresponding water bodies.

Key words: stable isotope tracers, deuterium, oxygen-18, tributaries and water body of the Ladoga lake, evaporation, atmospheric precipitations, groundwater.

Введение

Акватория Ладожского озера составляет около 16,7 тыс. км², площадь водосбора – 278 тыс. км², объем воды в озере – 838 км³. Водный баланс озера определяется

осадками, среднемноголетняя величина которых в бассейне озера для периода 1961–1990 гг. составляла около 790 мм/год при расчетной величине испарения около 400 мм/год [3]. Притоками Ладожского озера являются несколько тысяч рек, из которых лишь 97 % имеют длину менее 10 км. Наиболее крупным притоком является р. Свирь, соединяющая Ладогу с Онежским озером. Сток р. Свирь зарегулирован Верхнесвирской ГЭС.

В геологическом отношении южная часть ложа озера расположена в пределах осадочного чехла Восточно-Европейской платформы и соответствующего артезианского бассейна, а северная ванна – на Балтийском щите, сложенном архей-протерозойскими кристаллическими породами. Немного севернее зоны сочленения указанных структур на дно озера выходит силл, образующий на поверхности Вааламский архипелаг. В западной и южной частях озера под донными осадками и вендскими отложениями в депрессии фундамента залегают песчаники рифея, заполняющие Ладожский грабен. В плане грабен выходит за пределы акватории на несколько десятков километров.

Несмотря на длительность изучения бассейна Ладожского озера широким спектром методов в рамках решения практических задач и реализации разнообразных научных проектов ряд вопросов, касающихся количественной оценки параметров, определяющих водный баланс и качество воды, остается не до конца проясненным. В частности, возникают определенные проблемы с модельным воспроизведением годового хода осадков на Ладожском водосборе [4, 2, 11]. Имеет место довольно большой разброс в значениях испарения, рассчитанных по эмпирическим и модельным данным, причем среднее модельное испарение, как правило, несколько занижено по сравнению с рассчитанным по эмпирическим данным [6]. Есть указания на наличие субаквальной разгрузки подземных вод в озеро [3], однако локализация участков этой разгрузки, оценка ее вклада в формирование вещественного состава и практической значимости пока не выполнены. Обеспечение упомянутых выше моделей количественными параметрами, их верификация и калибровка, особенно с учетом масштабных эффектов, которые следует принимать во внимание при переносе натурных данных в математическую модель, а особенно при ее генерализации, представляют собой значительную трудность.

Известно, что стабильные изотопы – дейтерий (^2H) и кислород-18 (^{18}O), входящие в молекулу воды (далее – изотопный состав воды), широко используются как глобальные индикаторы при решении прикладных водохозяйственных задач и для фундаментальных исследований. Эти трассеры позволяют установить генетическую связь поверхностных вод с атмосферными осадками, водотоками и подземными водами, оценивать влияние испарения и темпы водообмена, а также отслеживать химическую трансформацию водных масс, поступающих из притоков в водоемы [12]. На взгляд авторов, использование дейтерия и кислорода-18 в качестве трассеров при изучении Ладожского озера и его водосбора позволит улучшить уровень интерпретации первичных данных, а также разрешить трудности, возникающие при построении математических моделей.

В данной работе рассматриваются первичные результаты исследования водосбора Ладожского озера с помощью дейтерия и кислорода-18, выполненные авторами в 2008–2016 гг. Хотя эти наблюдения не носили регулярного характера,

Исследование воды акваторий Ладожского озера выполнялось с борта НИС «Талан» и с катера «Полярник» (совместные работы с ААНИИ) на станциях мониторинга, расположенных в заливах и открытой части водоема (рис. 1 и 2). Рейсы в основном выполнялись в мае–июне и августе–сентябре. На большинстве

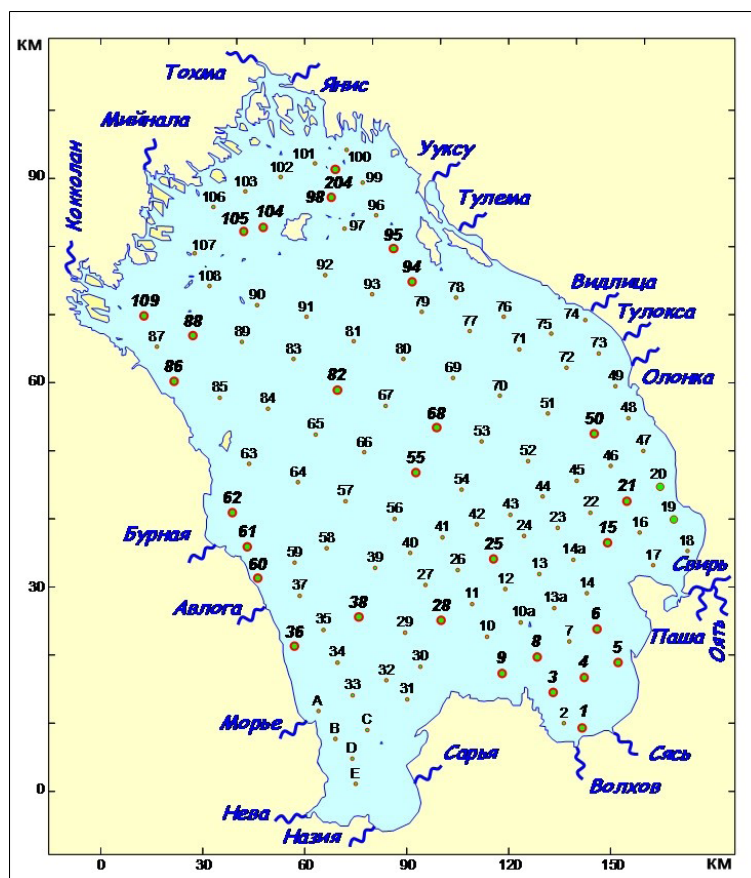




Рис. 2. Отбор проб в северной части акватории Ладожского озера с катера «Полярник», 2016 г.

станций пробы отбирались батометром с двух горизонтов – поверхностного (0,5 м) и придонного слоев. На отдельных станциях выполнялось более детальное опробование водной толщи (до 12 горизонтов).

Опробование притоков. На изотопный состав воды в весеннее-летне-осенний период в 2012–2016 гг. опробовано неоднократно 15 наиболее крупных притоков в нижнем течении или замыкающих створах (см. рис. 1). Ряд относительно мелких притоков опробовались единожды или двукратно.

Подземные воды. Исследованы воды осадочных комплексов и кристаллических пород (в содружестве с Петербургской комплексной геологической экспедицией). Пробы отбирались только из самоизливающих скважин или скважин, оборудованных электрическими насосами, а также восходящих родников. Это несколько сужало круг опробуемых водопунктов, но исключало необходимость прокачки скважин и снижало возможность случайного воздействия антропогенных, сезонных и других мешающих факторов.

Наблюдения за атмосферными осадками. С 2012 г. выполняются регулярные наблюдения за изотопным составом атмосферных осадков на станции Петродворец (территория СПбГУ) и на болотном полигоне Ламмин-Суо (7 км севернее г. Зеленогорск, работы выполнялись в содружестве с Государственным гидрологическим институтом). С 2009 г. наблюдения осуществляются также на станции Петрозаводск (в содружестве с Институтом водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, руководитель работ – ст. н. с., к. г.-м. н. Г.С. Бородулина). Отбор проб производится на среднедекадной и средненедельной основе, отдельно опробуются массивные выпадения.

Эксперименты по оценке влияния испарения на изотопный состав воды. В 2015–2016 гг. в различные сезоны выполнено около 50 экспериментов по оценке влияния неравновесного изотопного фракционирования при испарении на содержание дейтерия и кислорода-18 в остаточной воде. Рассчитаны уравнения, аппроксимирующие зависимость: $\delta^{18}\text{O} = f(\xi)$ и $\delta^2\text{H} = f(\xi)$, где ξ – доля испаренной воды.

Метод анализа. Пробы воды для анализа содержания кислорода-18 и дейтерия отбирались в пластиковые герметичные емкости объемом 20–150 мл. В некоторых случаях на месте определялась температура и электропроводность воды, а в лаборатории выполнялся сокращенный химический анализ.

Измерения содержания дейтерия и кислорода-18 в воде производились в основном на лазерном инфракрасном анализаторе изотопного состава воды *Picarro L-2120-i* (ресурсный центр «Геомодель», научный парк Санкт-Петербургского государственного университета). В качестве образцов сравнения использованы стандарты МАГАТЭ: *V-SMOW-2*, *GISP* и *SLAP*, а также стандарты Американского геологического общества: *USGS-45* и *USGS-46*.

В пробах 2008 и 2009 гг. во ВСЕГИНГЕО определялось только содержание кислорода-18 на масс-спектрометре МИ-1201 после уравнивания воды с углекислым газом. В качестве эталонов использовались внутрилабораторные образцы сравнения, привязанные к стандартам МАГАТЭ.

Неопределенность измерений во всех случаях составляет $\pm 0,1$ ‰ по кислороду-18 и ± 1 ‰ по дейтерию. Всего проанализировано около 560 проб. Все результаты приводятся в виде $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в промилле относительно состава средней океанической воды (*SMOW*).

Результаты и обсуждение

Атмосферные осадки. В атмосферных осадках наблюдается естественный временной ход изотопного состава, когда зимние осадки характеризуются наименьшими концентрациями дейтерия и кислорода-18, а летние – наибольшими.

В 2012–2016 гг. на станциях Петродворец и Ламмин-Суо наиболее легкий изотопный состав снега составил $\delta^{18}\text{O} = -24,3$ ‰ и $\delta^2\text{H} = -183$ ‰, наиболее тяжелый изотопный состав дождя – $\delta^{18}\text{O} = -6,1$ ‰ и $\delta^2\text{H} = -32$ ‰. Взвешенный среднегодовой состав атмосферных осадков рассчитан с учетом распределения объема и состава выпадений во времени и составляет $\delta^{18}\text{O} = -9,7$ ‰ и $\delta^2\text{H} = -75$ ‰. Локальная линия метеорных вод описывается уравнением $\delta^2\text{H} = 7,86 \cdot \delta^{18}\text{O} + 1,7$ ($n = 187$, $R^2 = 0,98$).

В 2009–2016 гг. для атмосферных осадков на станции Петрозаводск наиболее легкий изотопный состав снега составил $\delta^{18}\text{O} = -30,9$ ‰ и $\delta^2\text{H} = -239$ ‰, наиболее тяжелый изотопный состав дождя – $\delta^{18}\text{O} = -4,1$ ‰ и $\delta^2\text{H} = -26$ ‰. Взвешенный среднегодовой состав атмосферных осадков составляет $\delta^{18}\text{O} = -11,7$ ‰ и $\delta^2\text{H} = -84$ ‰. Локальная линия метеорных вод описывается уравнением $\delta^2\text{H} = 7,66 \cdot \delta^{18}\text{O} + 4,5$ ($n = 139$, $R^2 = 0,97$).

Притоки. В притоках Ладожского озера диапазон вариаций изотопного состава воды, естественно, значительно меньше, чем в осадках, вследствие осреднения стока на индивидуальных водосборах (рис. 3).

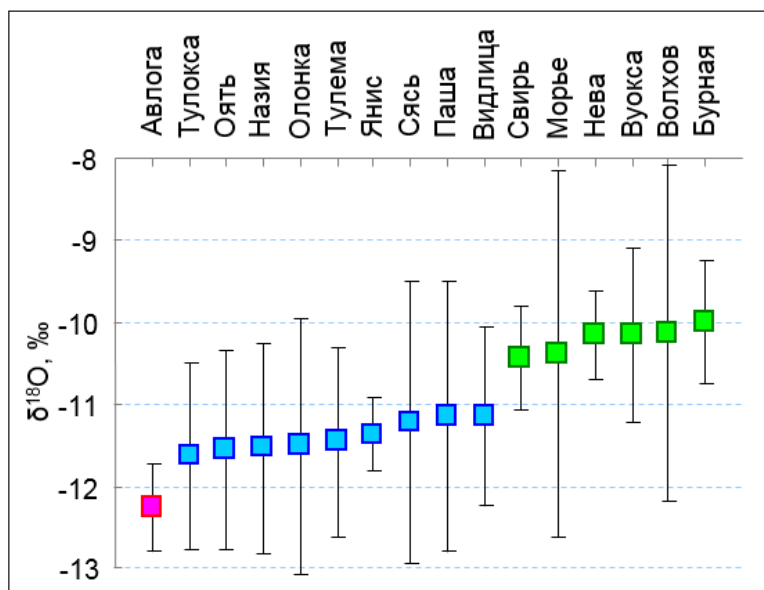


Рис. 3. Изотопный состав кислорода притоков Ладожского озера и р. Невы («усами» показано среднее квадратичное отклонение)

Наблюдается дифференциация состава воды притоков по сезонам (рис. 4). Летом и осенью содержание тяжелых изотопов в речной воде значительно выше, чем зимой, что отражает влияние утяжеления осадков в теплый период года. Зимой изотопный состав воды в реках оказывался существенно легче среднегодового для осадков из-за влияния разгрузки подземных вод, питание которых происходит в значительной степени в период весеннего половодья за счет изотопически легких осадков холодного периода года. В мае, иногда и в начале июня, в речном стоке ощущается вклад изотопически легкой снеготалой воды.

По абсолютным величинам $\delta^{18}\text{O}$ все притоки можно разделить на три группы (см. рис. 3):

1) Авлога – река с наиболее изотопически легкой водой и узким диапазоном вариаций изотопного состава кислорода во времени;

2) Тулокса, Оять, Назия, Олонка, Тулема, Сясь, Паша, Видлица – реки со средней по изотопному составу кислорода водой и несколько различающимся размахом сезонных вариаций;

3) Свирь, Морье, Вуокса и Бурная, Волхов – реки с наиболее изотопически тяжелой водой, со значительно различающимся размахом сезонных вариаций.

Обнаруженное устойчивое различие притоков по изотопному составу кислорода отражает в первую очередь особенности питания.

В частности, Авлога с $\delta^{18}\text{O} = -12,2(\pm 1,07) \text{‰}$, по-видимому, является базисом разгрузки регионального потока подземных вод в восточной части Карельского перешейка и, соответственно, имеет незначительную долю атмосферного питания. В пользу этого свидетельствует то обстоятельство, что соседняя, несколько

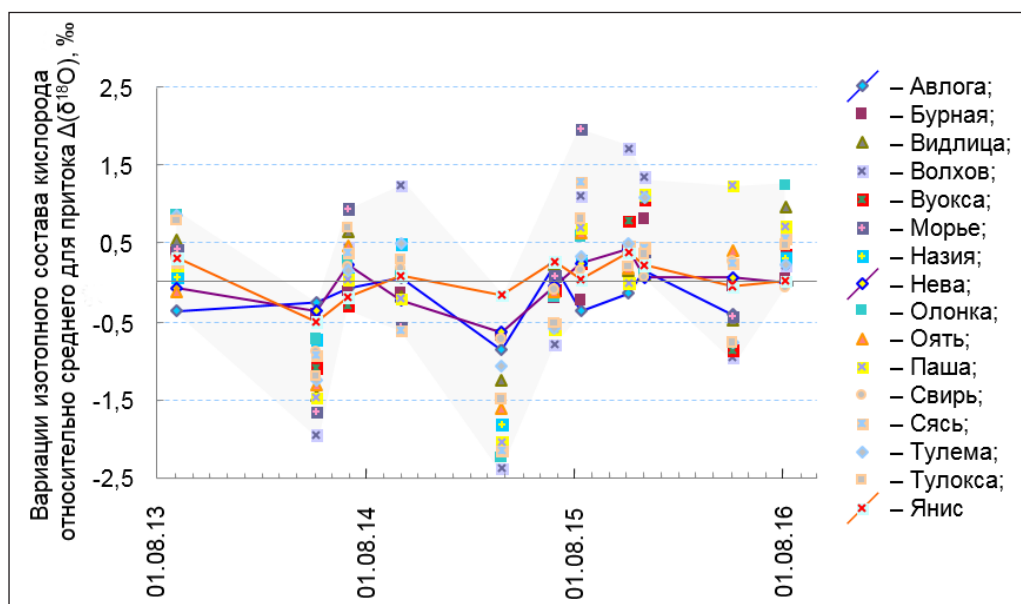


Рис. 4. Вариации изотопного состава кислорода притоков Ладожского озера и р. Невы во времени

южнее расположенная р. Морье (рис. 1) с аналогичными характеристиками водосбора несет существенно более тяжелый средний состав кислорода и отличается относительно большим размахом его вариаций $\delta^{18}\text{O} = -10,4 (\pm 4,45) \text{ ‰}$. Подземные воды, разгружающиеся в р. Авлогу, должны иметь относительно легкий, даже для подземных вод Карельского перешейка, изотопный состав и, вероятнее всего, отличаются значительным возрастом [1].

В качестве подтверждения возможности разгрузки регионального потока на этом участке водосбора приведем данные по скважине глубиной 250 м, расположенной несколько севернее р. Авлоги в пос. Луговое в районе южной оконечности озера Суходольского [10]. Скважина с открытым стволом опробовалась с помощью поинтервальных выпусков по мере углубления ходками по 50 м. В рифейском комплексе были вскрыты воды с напором 7 м над поверхностью земли (абсолютная отметка +18 м), что превышает отметку уреза воды в расположенном в 900 м к северу озере Суходольском (+6 м). При последовательном вскрытии разреза произошло постепенное увеличение дебита выпуска с 500 м³/сут до более чем 1000 м³/сут. Минерализация воды в вендском комплексе (верх разреза) составляла около 140 мг/л, а после вскрытия рифейских отложений достигла 640 мг/л. Произошла смена состава подземных вод с $\text{HCO}_3\text{--Ca--Mg}$ на $\text{Cl--HCO}_3\text{--Na}$ и заметно изменилось содержание некоторых микроэлементов. Изотопный состав кислорода облегчился от $\delta^{18}\text{O} = -13,4 \text{ ‰}$ в вендском комплексе до $\delta^{18}\text{O} = -16,6 \text{ ‰}$ при выпуске из вендского и рифейского комплексов одновременно.

Похоже, что малые неозерные реки (Янис) северного Приладожья также могут иметь преимущественное подземное питание в течение всего года, о чем

свидетельствуют легкий изотопный состав воды в летний период – $\delta^{18}\text{O} = -11,4\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -83\text{‰}$ (в среднем) – и малые вариации изотопного состава за период наблюдений. Однако в бассейне р. Янис, по-видимому, отсутствуют подземные воды с большим возрастом и, соответственно, легким изотопным составом. Последнее связано с тем, что бассейн р. Янис располагается уже в пределах Балтийского гидрогеологического массива, в то время как бассейн р. Авлоги – на северной границе платформы.

Вторая группа рек с $\delta^{18}\text{O} = -11,6\text{‰} \dots -11,2\text{‰}$ – с несколько более тяжелым изотопным составом кислорода, чем в р. Авлоге, по-видимому, имеет примерно одинаковый вклад подземного и атмосферного питания. В силу этого они характеризуются несколько более легким изотопным составом по сравнению со взвешенным среднегодовым составом атмосферных осадков, относительно небольшой и примерно одинаковый размах содержания кислорода-18.

Третья группа рек отличается наиболее тяжелым изотопным составом $\delta^{18}\text{O} = -10,4\text{‰} \dots -10,0\text{‰}$, приближающимся к взвешенному среднегодовому составу осадков, и, как правило, имеет значительный сезонный разброс величины $\delta^{18}\text{O}$, что указывает на преимущественно атмосферное питание.

В пределах водосборов происходит перемешивание осадков различных сезонов, о чем свидетельствует постепенное уменьшение размаха вариаций $\delta^{18}\text{O}$ в году (рис. 5). При этом всплеск вариативности параметра $\delta^{18}\text{O}$ в конце июля и начале августа соответствует годовому пику атмосферных осадков.

Для крупных рек зависимость изотопного состава воды от сезона года менее выражена, чем для малых водотоков. Для р. Свирь изменчивость параметра $\delta^{18}\text{O}$ –

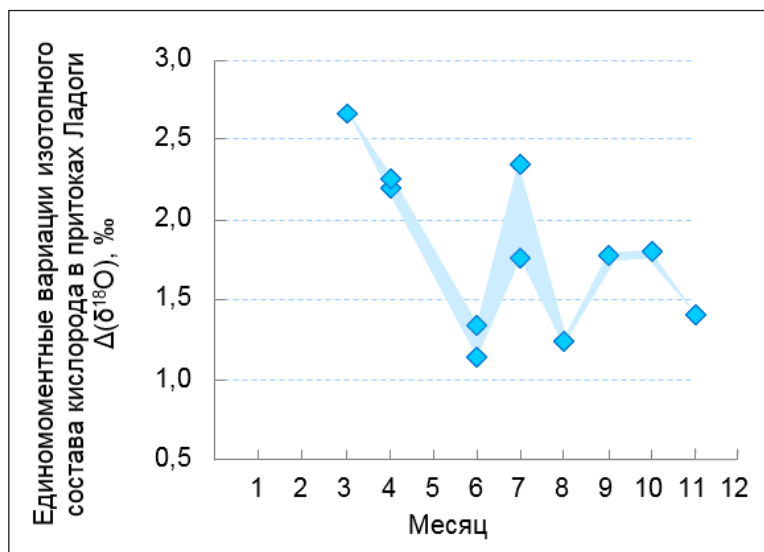


Рис. 5. Средний размах единомоментных вариаций изотопного состава кислорода относительно среднееголетнего для притоков Ладоги в различные периоды года за 2012–2016 гг.

одна из самых небольших в силу осреднения ее стока Онежским озером, среднее время пребывания воды в котором составляет около 16 лет [5]. Аналогично невысока изменчивость и изотопного состава кислорода в воде р. Невы. Вероятнее всего, межгодовое перераспределение стока может происходить также на крупных водосборах, а не только в Ладожском и Онежском озерах. Интересно, что среди крупных рек изотопный состав меняется наиболее значительно в р. Волхов, указывая на наибольшую долю атмосферного питания на его водосборе. На этом фоне незначительные вариации параметра $\delta^{18}\text{O}$ в малых реках Авлога, Янис и Бурная особенно заметны.

Приведенные выше соображения насчет условий питания притоков Ладоги, полученные на основании анализа изотопного состава их воды, в целом согласуются с многолетними гидрологическими наблюдениями [8, 9]. Исключение составляет р. Авлога, для которой значимость подземного питания не оценивалась напрямую, а в качестве реки-аналога была выбрана р. Морье, что является ошибкой.

Для многих притоков летом отмечается влияние испарения на водосборах (на диаграмме $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ точки смещены вправо от ЛЛМВ). Для крупных рек смещение изотопных составов за счет испарения отмечается не только в летнем, но и в зимнем стоках, что также указывает на межгодовое перераспределение стока на их водосборах. Расчет потерь на испарение производился на основании экспериментальных зависимостей изотопного состава остаточной воды от доли испарившейся. Расчетная доля потерь воды на испарение с речных водосборов летом достигает 23 %.

Ладожское озеро. Изотопный состав воды в Ладожском озере в целом относительно стабилен – $\delta^{18}\text{O} = -11,7 \dots -9,5 \text{‰}$ (в среднем $\delta^{18}\text{O} = -10,6 \text{‰}$), $\delta^2\text{H} = -84 \dots -74 \text{‰}$ (в среднем $\delta^2\text{H} = -78 \text{‰}$), что свидетельствует о достаточно интенсивном перемешивании воды на акватории. На диаграмме $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ фигуративные точки для озерной воды практически всегда оказываются несколько смещены вправо относительно изотопного состава атмосферных осадков, что свидетельствует о влиянии испарения (рис. 6). Отметим, что в измерениях 2008–2009 гг. присутствовали только данные по кислороду-18, что не дает возможности идентифицировать эффект испарения, откуда следует, что в дальнейшем для корректной интерпретации исходных данных измерения должны включать оба параметра – и $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$.

В годовом разрезе времени наблюдается утяжеление изотопного состава воды в озере к концу лета (табл. 1 и рис. 7), что указывает:

- 1) на ослабление влияния весеннего половодья, привносящего в озеро изотопически легкую снеготалую воду;
- 2) поступление изотопически тяжелых летних осадков;
- 3) рост влияния испарения (на диаграмме $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ это отражается в постепенном смещении точек вправо от локальной линии метеорных вод).

В годовом разрезе времени происходит постепенное уменьшение размаха вариаций изотопного состава воды по акватории, отражая постепенное перемешивание водных масс.

Воздействие испарения на изотопный состав воды в Ладоге, однозначно диагностируемое по смещению фигуративных точек вправо относительно ЛЛМВ

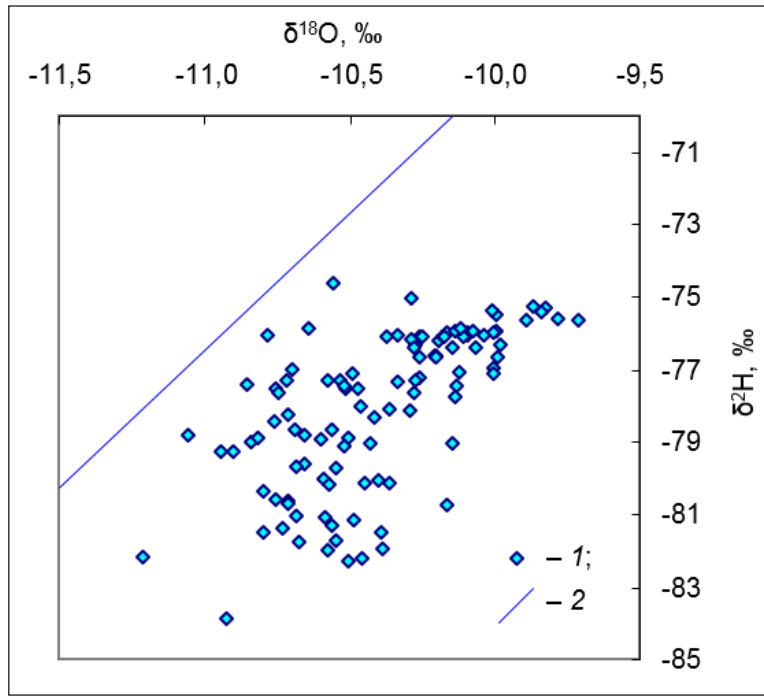


Рис. 6. Изотопный состав воды Ладожского озера по данным опробования в 2013–2016 гг. (в данных 2008 и 2009 гг. присутствуют измерения только изотопного состава кислорода):
 1 – изотопный состав воды в Ладоге; 2 – локальная линия метеорных вод

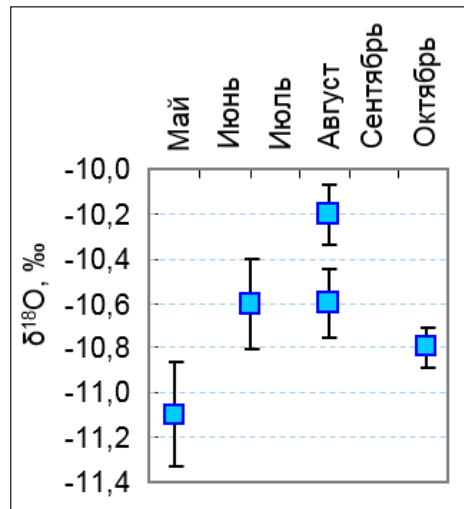


Рис. 7. Внутригодовое изменение среднего изотопного состава кислорода и размаха его вариаций в воде Ладожского озера

Таблица 1

Внутригодовое изменение среднего изотопного состава кислорода и размаха его вариаций в воде Ладожского озера

Дата	Средняя величина $\delta^{18}\text{O}$	Стандартное отклонение
Октябрь 2008 г.	-10,8	0,091
Май 2009 г.	-11,1	0,234
Август 2013 г.	-10,2	0,133
Август 2015 г.	-10,6	0,150
Июль 2016 г.	-10,6	0,321

на диаграмме $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$, обусловлено неравновесным изотопным фракционированием. Расчет с использованием экспериментальных зависимостей смещения изотопного состава под действием испарения дает долю испаренной воды от 5 % весной до 28 % в конце лета, составляя в среднем около 18 %. Начальный изотопный состав воды (до испарения) может быть приблизительно определен по точкам пересечения ЛЛМВ с линиями, аппроксимирующими изменение состава воды при испарении. На данный момент эта оценка составляет $\delta^2\text{H} = -78...-91$ ‰ и $\delta^{18}\text{O} = -11,2...-12,3$ ‰, что в целом совпадает с данными по изотопному составу притоков и обнаруживает влияние испарения не только с водосбора, но и с зеркала воды в озере.

При детальном опробовании северной ванны Ладожского озера в 2015 г. в толще воды были обнаружены значимые вариации параметра $\delta^{18}\text{O}$ (рис. 8).

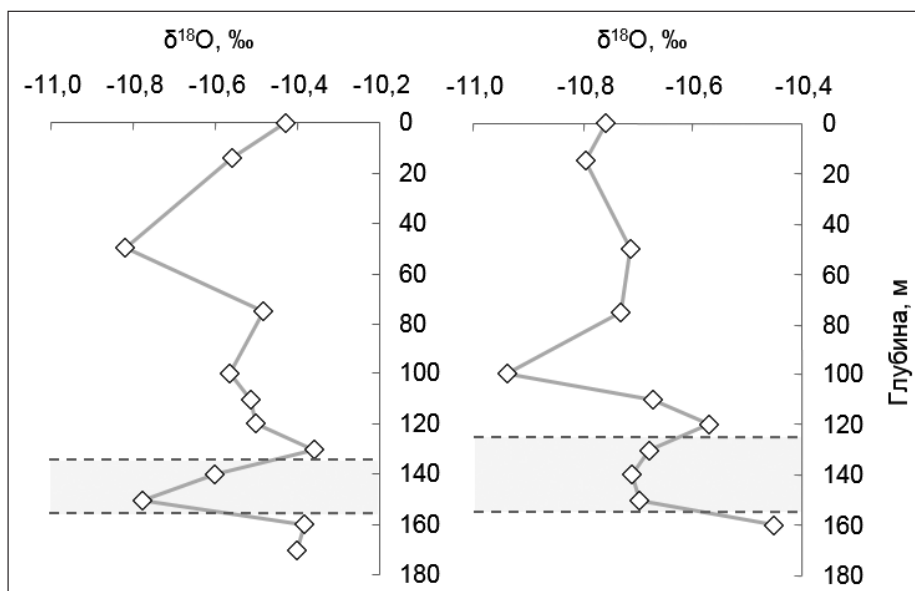


Рис. 8. Изотопный состав кислорода в разрезе водной толщи северной ванны Ладожского озера в 2015 г.

В придонной зоне несколькими точками по вертикали на глубинах 135–155 м фиксируется аномалия облегчения состава кислорода, происхождение которой нельзя связать с погружением в глубину слоя снеготалой изотопически легкой воды [7]. К влиянию последней нужно, скорее, отнести аномалии на глубинах около 30 м (см. рис. 8, левый) и 100 м (см. рис. 8, правый).

Местоположение аномалий и сопоставление условий их обнаружения с вышеприведенными данными по притокам и подземным водам, а также по геологическому строению озерного ложа дают основание предполагать, что их источником могут быть:

- речные воды, например Авлоги или другой, пока не идентифицированной реки с преимущественно подземным питанием, за счет их погружения по склону озерного ложа;

- субаквальная разгрузка подземных вод из рифейских отложений.

Субаквальная разгрузка подземных вод может быть связана с обнаруженной в северной части озера котловиной, которая прослеживается от берегового склона до основного ложа (рис. 9). Стенки этих глубоководных «каньонов» сложены песчаниками рифейского комплекса (рис. 10), который, как это указывалось выше, содержит в этой области изотопически легкие древние воды регионального потока.

На рис. 9 приведена поверхность дна в северной (глубоководной) части Ладожского озера, построенная по данным профилирований с помощью многолучевого эхолота EM2040. Результаты получены в 2012 г. совместно со специалистами ЗАО «МАРИМЕТР». На северных пологих склонах дна Ладожского озера породы рифейского комплекса обнажаются и в виде уступов и обрывов.

В 2009 г. в Западно-Валаамской глубоководной впадине, в которой по данным изотопных исследований в 2015 г. на точке № 105 (см. рис. 1) были зафиксированы локальные понижения концентрации стабильного изотопа кислорода, с борта НИС «Талан» были проведены геофизические исследования. Для изучения строения

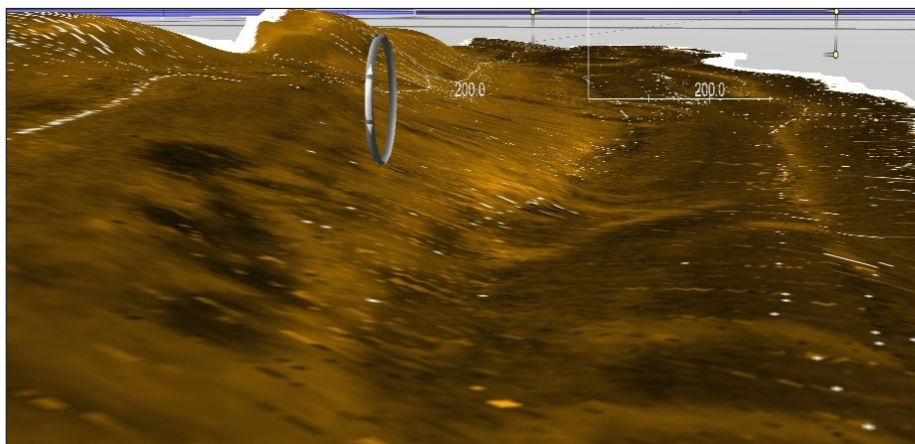


Рис. 9. Вид склона дна в северной части Ладожского озера, вдоль которого прослеживается обнажение рифейских пород. Получено с помощью многолучевого эхолота EM2040, глубины от 70 до 180 м

дна использовали сейсмоакустический комплекс «ГЕОНТ–HRP» для непрерывного сейсмоакустического профилирования Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (ФГУП «ВСЕГЕИ»).

По геофизическим данным достаточно надежно выделяется рифейская грабен-синклинальная структура, которая ограничивает площадь развития самостоятельного рифейского водоносного комплекса (РВК) (см. рис. 10). Водоносные горизонты РВК связаны, скорее всего, с песчаниками рифея, а водоупором служат субвулканические образования валаамского силла. Плейстоценовая ледовая экзорация и эрозия привели к селективному выпахиванию рифейских песчаников с образованием естественных подводных обнажений в крутых склонах, где можно предполагать наличие зон разгрузки подземных вод (субаквальных напорных источников). У подножья уступа, расположенного в южной части профиля НСП с высокой долей вероятности также устанавливается крупное разрывное нарушение (разлом), вероятно, с обнажением не только водоупорных образований, но и локально водоносных песчаников. Геологическая интерпретация разреза в зоне указанного разлома: *а* – бронирующие габроиды валаамского силла; *б* – рифейские песчаники; *в* – четвертичные отложения; *г* – разгрузка воды из рифейских песчаников – приведена на рис. 10.

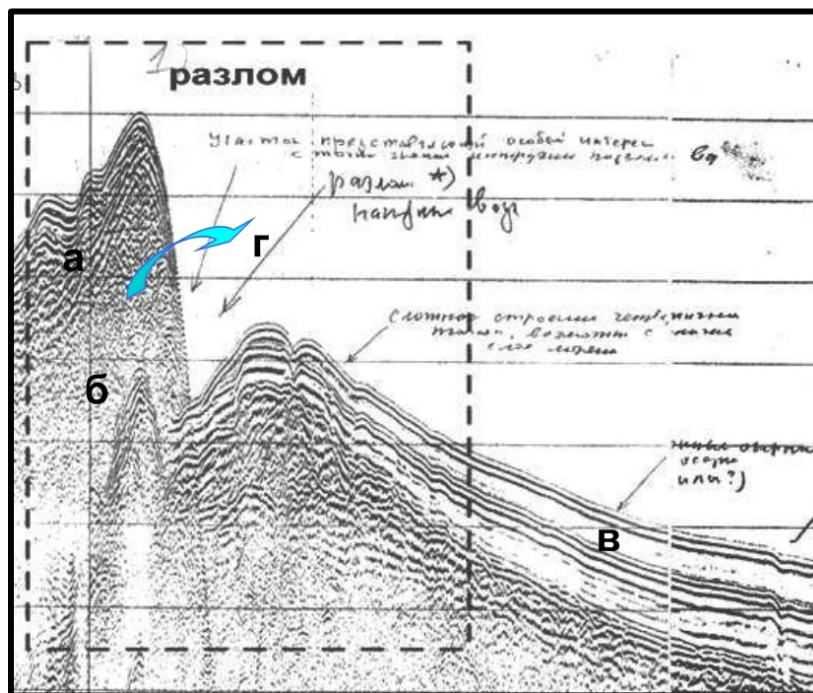


Рис. 10. Геологическая интерпретация разреза по профилю НСП в зоне разлома в Западно-Валаамской глубоководной впадине: *а* – бронирующие габроиды валаамского силла; *б* – рифейские песчаники (рифейского водоносного комплекса); *в* – четвертичные отложения; *г* – вода из рифейских песчаников

Таким образом, вблизи подводных обнажений рифейских песчаников на дне Ладожского озера на фоне относительно стабильного изотопного состава, близкого к среднему для Ладоги, обнаруживаются аномалии с более изотопически легкой водой.

Для выяснения природы аномалий предполагается провести дополнительные исследования в северной ванне озера с привлечением методов полевой геофизики и более детальным опробованием разреза воды.

Выводы

В 2008–2016 гг. в бассейне Ладожского озера выполнены работы по исследованию условий формирования баланса и динамики водных масс на базе данных об изотопном составе воды (содержаниях кислорода-18 – $\delta^{18}\text{O}$ и дейтерия – $\delta^2\text{H}$). Впервые получен значительный объем единовременных данных по распределению дейтерия и кислорода-18 в атмосферных осадках, поверхностном стоке, подземных водах и в водной толще Ладожского озера, а также проведены эксперименты по оценке влияния испарения на изотопный состав остаточной воды.

В 2012–2016 гг. на станциях Петродворец и Ламмин-Суо изотопный состав осадков варьировал в пределах $\delta^{18}\text{O} = -24,3 \dots -6,1 \text{ ‰}$ и $\delta^2\text{H} = -183 \dots -32 \text{ ‰}$, закономерно утяжеляясь летом и облегчаясь зимой. Взвешенный среднегодовой состав атмосферных осадков, рассчитанный с учетом распределения объема и состава выпадений во времени, составил $\delta^{18}\text{O} = -9,7 \text{ ‰}$ и $\delta^2\text{H} = -75 \text{ ‰}$. Локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ) имеет вид $\delta^2\text{H} = 7,86 \cdot \delta^{18}\text{O} + 1,7$ ($n = 187$, $R^2 = 0,98$). В 2009–2016 гг. для атмосферных осадков на станции Петрозаводск аналогичные характеристики составили: вариации $\delta^{18}\text{O} = -30,9 \dots -4,1 \text{ ‰}$ и $\delta^2\text{H} = -239 \dots -26 \text{ ‰}$, взвешенный среднегодовой состав $\delta^{18}\text{O} = -11,7 \text{ ‰}$ и $\delta^2\text{H} = -84 \text{ ‰}$, ЛЛМВ – $\delta^2\text{H} = 7,66 \cdot \delta^{18}\text{O} + 4,5$ ($n = 139$, $R^2 = 0,97$).

По изотопному составу притоки Ладоги достаточно четко разделяются на три группы:

1. Авлога $\delta^{18}\text{O} = -12,2 \text{ ‰}$ – река с наиболее изотопически легкой водой и узким диапазоном вариаций изотопного состава кислорода во времени, по-видимому, является базисом разгрузки регионального потока подземных вод в восточной части Карельского перешейка и имеет незначительную долю атмосферного питания. Вероятно, в эту же группу следует отнести р. Янис вследствие малых вариаций изотопного состава, однако в ее питании принимают участие подземные воды только верхнего гидродинамического этажа.

2. Тулокса, Оять, Назия, Олонка, Тулема, Сясь, Паша, Видлица $\delta^{18}\text{O} = -11,6 \dots -11,2 \text{ ‰}$ – реки со средней по изотопному составу кислорода водой и несколько большим, чем в р. Авлоге, но мало различающимся и относительно небольшим размахом сезонных вариаций, по-видимому, имеют примерно одинаковый вклад подземного и атмосферного питания.

3. Свирь, Морье, Вуокса и Бурная, Волхов $\delta^{18}\text{O} = -10,4 \dots -10,0 \text{ ‰}$ – реки с наиболее изотопически тяжелой водой, большим и значительно различающимся размахом сезонных вариаций, что указывает на преимущественно атмосферное питание.

Изотопный состав воды в Ладожском озере в целом относительно стабилен $\delta^{18}\text{O} = -11,7 \dots -9,5 \text{ ‰}$ (в среднем $\delta^{18}\text{O} = -10,6 \text{ ‰}$), $\delta^2\text{H} = -84 \dots -74 \text{ ‰}$ (в среднем

$\delta^2\text{H} = -78 \text{ ‰}$), что свидетельствует о достаточно интенсивном перемешивании воды на акватории. На диаграмме $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ фигуративные точки для озерной воды практически всегда оказываются несколько смещены вправо относительно состава атмосферных осадков, что свидетельствует о влиянии испарения. Расчет с использованием экспериментальных зависимостей смещения изотопного состава под действием испарения дает долю испаренной воды от 5 % весной до 28 % в конце лета, составляя в среднем около 18 %. Начальный изотопный состав воды (до испарения) составляет приблизительно $\delta^2\text{H} = -78...-91 \text{ ‰}$ и $\delta^{18}\text{O} = -11,2...-12,3 \text{ ‰}$, что в целом совпадает с данными по изотопному составу притоков и обнаруживает влияние испарения не только с водосбора, но и с зеркала воды в озере.

В разрезе водной толщи северной ванны Ладожского озера на глубинах 135–155 м фиксируется аномалия облегчения состава кислорода, происхождение которой может объясняться погружением речных вод, например Авлоги, по склону озерного ложа или субаквальной разгрузкой подземных вод из рифейских отложений. Последнее предположение кажется более достоверным, поскольку в дне северной ванны геофизическими работами обнаружены обнажения рифейских песчаников, лишенные осадочного покрова, а подземные воды рифейских отложений характеризуются несколько повышенной минерализацией и стабильной (во времени) температурой. Для выяснения природы аномалий предполагается провести дополнительные исследования с привлечением методов полевой геофизики и геохимии, а также более детальное опробование разреза воды.

Полученные результаты доказывают перспективность внесения изотопного опробования в состав исследовательских работ в бассейне Ладожского озера. Наличие индивидуальных особенностей в пространственном и временном распределении содержания дейтерия и кислорода-18 в притоках, озере и подземных водах позволяет обоснованно предполагать, что эти данные могут быть использованы при построении математических моделей соответствующих водных объектов.

Литература

1. *Водообмен* в краевых частях Балтийского щита и прилегающих артезианских бассейнах по изотопным и химическим данным (научные и прикладные аспекты). Карельский перешеек / Г.Ю. Воронюк, Г.С. Бородулина, И.А. Крайнюкова, И.В. Токарев // Труды Карельск. научн. центра. Сер. Лимнология. 2016, № 9. – С. 46–56.
2. Голицын Г.С., Мелешко В.П., Ефимова Л.К. и др. Анализ составляющих водного и теплового балансов на водосборе Ладожского озера, рассчитанных по моделям общей циркуляции атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36, № 4. – С. 435–445.
3. Калесник С.В. Ладожское озеро. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 160 с.
4. Мелешко В.П., Голицын Г.С., Володин Е.М. и др. Расчет составляющих водного баланса на водосборе Каспийского моря с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34, № 4. – С. 591–599.
5. Онежское озеро. Атлас / отв. ред. Н. Н. Филатов. – Петрозаводск: Карельск. научн. центр РН, 2010. – 151 с.
6. Моделирование температурно-влажностного режима водосбора Ладожского озера / В.А. Румянцев, Л.К. Ефимова, Г.С. Голицын и др. // Изв. РАН. Сер. Географическая. 2007, № 1. – С. 130–135.
7. Вариации температурного и гидрологического режимов региона водосборного бассейна Ладожского озера в XX и XXI вв. по данным современных моделей климата / В.А. Румянцев, Л.К. Ефимова, Г.С. Голицын, В.Ч. Хон // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46, № 1. – С. 26–34.

8. *СКИОВО* Карелия. Схема комплексного использования и охраны водных объектов Карелии бассейна Балтийского моря (русская часть бассейнов, код 01.05.00). Кн. 1. Общая характеристика бассейнов рек Карелии бассейна Балтийского моря (русская часть бассейнов). Невско-Ладожское бассейновое водное управление Федерального агентства водных ресурсов. – СПб., 2014. – 67 с.
9. *СКИОВО* Волхов. Схема комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО) бассейна реки Волхов. Кн. 1. Общая характеристика бассейна реки Волхов. Невско-Ладожское бассейновое водное управление Федерального агентства водных ресурсов. – СПб., 2015. – 87 с.
10. Токарев И.В., Рыбакин В.Н., Румянцев В.А., Воронюк Г.Ю. Гидрогеологический режим Карельского перешейка и разгрузка подземных вод в Ладожское озеро // Всеросс. конф. по крупным водоемам (V Ладожский симпозиум). Санкт-Петербург, 9–11 ноября 2016 г. Сб. научн. трудов. – СПб.: Ин-т озеровед. РАН, ООО «Изд-во “ЛЕМА”», 2016. – С. 426–430. ISBN 978-5-00105-077-3.
11. Golitsyn G.S., Efimova L.K., Mokhov I.I. et al. Changes of temperature of air and precipitation for the lake Ladoga basin according to results of long term integration of ECHAM4/OPYC and HadCM3 models // Proc. Of the Fourth International Lake Ladoga Symposium 2002 / Eds: H. Simola, A.Yi. Terzhevik, M. Viljanen et al. – Joensuu, 2003. – P. 449–455.
12. Jasechko S., Gibson J.J., Edwards T.W.D. Stable isotope mass balance of the Laurentian Great Lakes // Journal of Great Lakes Research. 2014. V. 40. – P. 336–346.