

УДК 556.556:556.114(282.247.211)(282.247.212)

ОЦЕНКА ВНЕШНЕГО ВОДООБМЕНА ЗАЛИВОВ ОЗЕР ПО ХИМИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ ВОДЫ¹

© 2019 г. П. А. Лозовик¹, М. Б. Зобков^{1*}, Г. С. Бородулина¹, И. В. Токарев²

¹Институт водных проблем Севера — обособленное подразделение КарНЦ РАН
Россия 185030 Петрозаводск

²Ресурсный центр рентгенодифракционных методов исследований,
Научный парк Санкт-Петербургского государственного университета
Россия 199155 Санкт-Петербург

*E-mail: duet@onego.ru

Поступила в редакцию 13.03.2016 г.

После доработки 23.12.2017 г.

Принята к печати 26.12.2017 г.

Внешний водообмен заливов Онежского (Кондопожская и Петрозаводская губы) и Ладожского (зал. Хиденселькя) озер, включая обмен с озерами, оценен по химическому составу заливов, приточных вод и объему водного стока в заливы. Установлено, что период водообмена Петрозаводской губы составляет 0.13, Кондопожской губы — 1.02, зал. Хиденселькя — 1.15 года. Их водообмен в 2–3 раза выше, чем водообмен без учета поступления озерных вод. Данные по водообмену Петрозаводской губы подтверждаются сезонными изменениями изотопного состава воды.

Ключевые слова: внешний водообмен залива, Онежское озеро, Ладожское озеро, залив Хиденселькя, Петрозаводская губа, Кондопожская губа, химический и изотопный состав воды.

DOI: 10.31857/S0321-059646191-101

ВВЕДЕНИЕ

Для характеристики функционирования озерных экосистем требуется информация по внешнему водообмену их заливов, т.е. интенсивности замены воды в заливе новыми водами, поступающими извне, включая и озерные. Заливы, состав воды которых близок к составу озерных вод, характеризуются и хорошим водообменом с озером. И наоборот, в заливах с составом вод, близким к составу приточных, отмечается замедленный водообмен с озером. В любом случае расчеты коэффициентов условного водообмена залива без учета озерной составляющей в водном балансе приводят к неверной оценке внешнего водообмена. В гидрологической литературе уделяется большее внимание методам оценки внешнего водообмена водохранилищ и отдельных их участков [3, 4, 11, 14]. В этой связи необходимо отметить ра-

боты [12–14], в которых предложено для характеристики водообновления водохранилищ использовать химические показатели воды. Если применительно к водохранилищам такие подходы оценки водообмена отдельных участков представлены в литературе, то для заливов крупных озер известны единичные работы. Для оценки водообмена заливов Онежского озера в [2] применен коэффициент относительной глубины. Перспективны также изотопные трассеры [15–17]. В работе [10] космогенный изотоп ²²Na использован при изучении шхерного района Ладожского озера. Из изотопных трассеров наиболее удобно применение дейтерия и кислорода-18, входящих в молекулу воды, что существенно упрощает измерения и расчеты. Например, результаты регулярного наблюдения за изотопами водорода и кислорода для Ладожского озера представлены в работе [6].

Однако оценка водообмена заливов по соотношению изотопов требует проведения специализированных полевых и лабораторных исследований, а данные о химическом составе воды для крупных водных объектов и их районов зачастую доступны в научной литературе. Разра-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИВПС КарНЦ РАН (АААА-А17-117041910017-8 “Научные основы оценки состояния и функционирования водных объектов гумидной зоны по химическим и кинетическим параметрам”), исследование изотопного состава воды выполнено при поддержке РФФ (проект 14-17-00766).

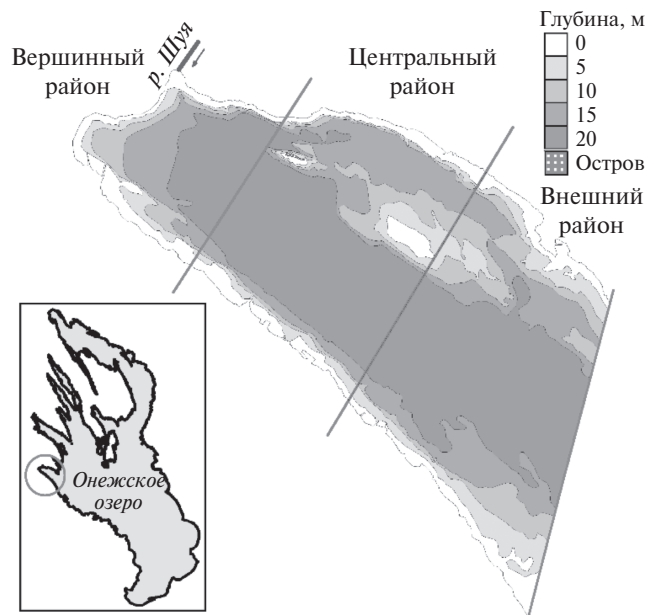


Рис. 1. Картограмма глубин и районирование Петрозаводской губы Онежского озера.

ботка методики оценки водообмена заливов по химическим показателям качества воды позволит проводить такую оценку без существенных дополнительных затрат.

Поэтому цель данной работы – разработка методики оценки внешнего водообмена заливов озер по химическим показателям воды. Поскольку водообмен губ также может определяться региональными особенностями стока, в частности сезонными или гидрологическими, то они будут рассмотрены более подробно на примере некоторых заливов Ладожского и Онежского озер, для которых те или иные факторы наиболее актуальны.

МАТЕРИАЛЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования были Петрозаводская (рис. 1) и Кондопожская (рис. 2) губы Онежского озера и один из заливов северной части Ладожского озера – Хиденселькя (рис. 3).

Заливы отличаются друг от друга размерами, морфометрией, глубиной, интенсивностью водообмена. Петрозаводская губа, из них самая мелководная и наименьшая по площади, отличается высокой проточностью. В губу впадают реки Шуя – второй по площади водосбора и величине стока приток Онежского озера, Лососинка и Неглинка. Химический состав губы наиболее сильно подвержен сезонному изменению. Кондопожская губа – один из крупных глубоководных заливов Онежского озера. В вер-

шинную часть губы через Кондопожский канал поступает ~95% стока р. Суны – третьего по объему стока притока Онежского озера. Также в вершинную часть губы поступают воды Кондопожского промцентра. Губа протяженностью 35 км ориентирована в направлении преобладающих северо-западных ветров, акватория изрезана множеством островов и мелководных луд, замедляющих водообмен с открытой частью озера. В этой связи актуально рассмотреть пространственное распределение интенсивности водо-

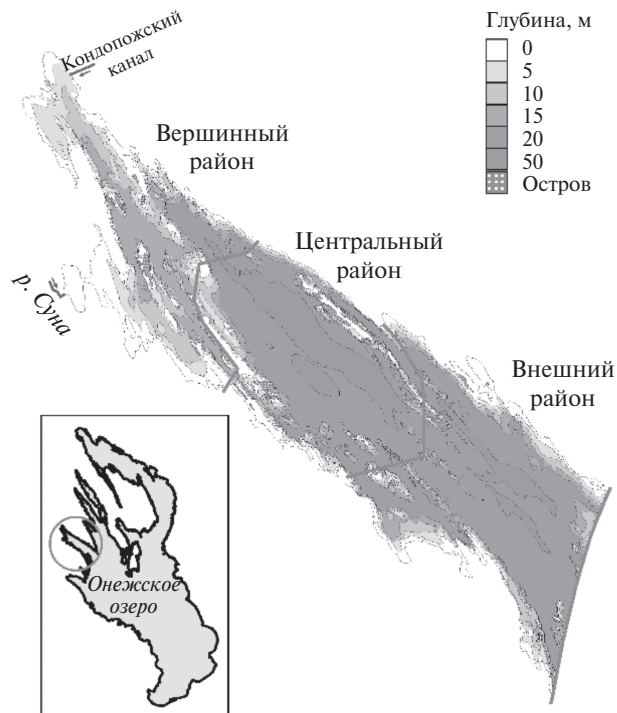


Рис. 2. Картограмма глубин и районирование Кондопожской губы Онежского озера.

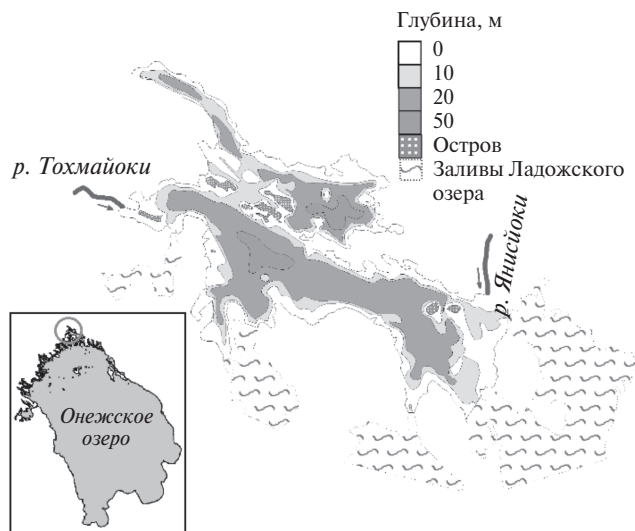


Рис. 3. Картограмма глубин зал. Хиденселькя Ладожского озера.

обмена по районам губы. Ладожский зал. Хиденселькя отделен от озера крупными островами, в отличие от относительно открытых губ Онежского озера. Роль двух притоков (рек Тохмайоки и Янисйоки) в водном балансе зал. Хиденселькя достаточно сложная. Несмотря на то, что р. Янисйоки не впадает непосредственно в залив, а ее устье находится на границе залива, следует ожидать влияние р. Янисйоки на водообмен с зал. Хиденселькя в связи с большим расходом реки (1.32 км³/год) и с отклонением ее течения вправо под действием сил Кориолиса. Подтверждением этого служат данные зимней съемки 2000 г., когда по химическим показателям в центре залива обнаруживались воды р. Янисйоки [8]. Расход воды второго притока – р. Тохмайоки значительно меньше (0.29 км³/год), и, кроме того, по небольшой заросшей протоке часть (~30%) стока реки направляется в соседний Сортавальский залив (рис. 3).

Проблема оценки водообмена зал. Хиденселькя заключается в том, что неизвестны объемы поступающих в залив водных масс р. Янисйоки и можно ориентироваться только на гидрохимические данные.

Измерения изотопного состава воды выполнены в Ресурсном центре рентгенодифракционных методов исследований Научного парка СПбГУ.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВНЕШНЕГО ВОДООБМЕНА ЗАЛИВОВ ОЗЕР

Период водообмена залива (τ) определяется отношением объема вод в заливе ($V_{\text{зал}}$) к сумме годовых объемов приточных ($V_{\text{прит}}$) и поступающих в залив озерных ($V_{\text{оз}}$) вод:

$$\tau = \frac{V_{\text{зал}}}{V_{\text{прит}} + V_{\text{оз}}} \quad (1)$$

За объем приточных вод в залив принимается сумма объемов стока рек ($V_{\text{рек}}$), атмосферных осадков ($V_{\text{ат}}$), выпадающих на поверхность залива в год, подземных вод ($V_{\text{подз}}$), разгружающихся непосредственно в залив, и сточных вод ($V_{\text{ст}}$):

$$V_{\text{прит}} = V_{\text{рек}} + V_{\text{ат}} + V_{\text{подз}} + V_{\text{ст}} \quad (2)$$

В водном и химическом балансе водоемов Карелии приход подземных вод количественно учтен в объеме среднесноголетнего речного стока, а прямой приток подземных вод с прибрежной территории, не подверженной дренирующему воздействию рек и ручьев, рассчитан по основной зависимости Дарси [1].

Доля озерных вод в заливе составляет:

$$\rho_{\text{оз}} = \frac{V_{\text{оз}}}{V_{\text{оз}} + V_{\text{прит}}} \quad (3)$$

доля приточных:

$$\rho_{\text{прит}} = \frac{V_{\text{прит}}}{V_{\text{оз}} + V_{\text{прит}}} \quad (4)$$

$$\text{или } \rho_{\text{прит}} = 1 - \rho_{\text{оз}} \quad (5)$$

С учетом этих величин можно оценить средневзвешенную концентрацию вещества в заливе:

$$\bar{C}_{\text{зал}} = \rho_{\text{оз}} \bar{C}_{\text{оз}} + \rho_{\text{прит}} \bar{C}_{\text{прит}} = \rho_{\text{оз}} \bar{C}_{\text{оз}} + (1 - \rho_{\text{оз}}) \bar{C}_{\text{прит}} \quad (6)$$

где $\bar{C}_{\text{оз}}$ – средняя концентрация вещества в озере, $\bar{C}_{\text{зал}}$ и $\bar{C}_{\text{прит}}$ – средневзвешенные концентрации вещества в заливе и приточных водах соответственно. За концентрацию вещества в приточных водах ($\bar{C}_{\text{прит}}$) принимается средневзвешенная концентрация всех источников формирования состава воды:

$$\bar{C}_{\text{прит}} = \rho_{\text{рек}} C_{\text{рек}} + \rho_{\text{ат}} C_{\text{ат}} + \rho_{\text{подз}} C_{\text{подз}} + \rho_{\text{ст}} C_{\text{ст}} \quad (7)$$

где $\rho_{\text{рек}}$, $\rho_{\text{ат}}$, $\rho_{\text{подз}}$, $\rho_{\text{ст}}$, $C_{\text{рек}}$, $C_{\text{ат}}$, $C_{\text{подз}}$, $C_{\text{ст}}$ – соответственно объемные доли рек, атмосферных осадков, подземных и сточных вод в водном балансе приточных вод и средняя концентрация вещества в их водах.

Следовательно, доля озерных вод может быть выражена так:

$$\rho_{\text{оз}} = \frac{\bar{C}_{\text{зал}} - \bar{C}_{\text{прит}}}{\bar{C}_{\text{оз}} - \bar{C}_{\text{прит}}} \quad (8)$$

С учетом (5) доля приточных составит:

$$\rho_{\text{прит}} = \frac{\bar{C}_{\text{оз}} - \bar{C}_{\text{зал}}}{\bar{C}_{\text{оз}} - \bar{C}_{\text{прит}}} \quad (9)$$

Приравняв формулы (4) и (9) и умножив обе части равенства на $V_{\text{зал}}/V_{\text{прит}}$, а также используя (1), можно рассчитать период водообмена залива по притоку с учетом поступления в залив озерных вод:

$$\tau = \frac{V_{\text{зал}} (\bar{C}_{\text{оз}} - \bar{C}_{\text{зал}})}{V_{\text{прит}} (\bar{C}_{\text{оз}} - \bar{C}_{\text{прит}})} \quad (10)$$

Для расчета подходят концентрации консервативных веществ, содержание которых не меняется в результате внутриводоемных процессов. Важное условие использования формулы (10) – различие концентраций веществ в озерных и приточных водах.

Для высокопроточных заливов расчет периода их водообмена можно выполнять по формуле (10), используя данные по содержанию неконсервативных веществ, поскольку их трансфор-

мация в таких заливах несущественна. В случае заливов с замедленным водообменом при расчете τ по содержанию лабильных веществ следует учитывать их трансформацию. В таком случае формула расчета τ будет выглядеть следующим образом:

$$\tau = \frac{V_{\text{зал}} (\bar{C}_{\text{оз}} - \bar{C}_{\text{зал}})}{V_{\text{прит}} (\bar{C}_{\text{оз}} - \bar{C}_{\text{прит}} e^{-k})}, \quad (11)$$

где k – константа скорости трансформации вещества. В формулах (10) и (11) в качестве $\bar{C}_{\text{зал}}$ используются средневзвешенные концентрации веществ в заливе без учета испарения. Для этого проводился перерасчет наблюдаемых концентраций путем умножения их на отношение объема залива без испарения к установленному объему залива.

РАСЧЕТ ОБЪЕМОВ ВОДНЫХ МАСС ЗАЛИВОВ ОЗЕР

Одна из основных гидрологических характеристик, которые потребуются для оценки водообмена заливов с открытой частью озера, – объем водной массы залива. Этот показатель можно определить с достаточной точностью, имея в распоряжении карты глубин изучаемой акватории. Значительно упростить и ускорить этот процесс может применение современных геоинформационных систем. Для расчета объемов водных масс в заливах Ладожского и Онежского озер применялась геоинформационная система MapInfo. Поскольку Онежское и Ладожское озера судоходные, наиболее простым и точным способом для расчета объемов их заливов было использование навигационных карт в растровом формате JPG. Первым этапом была регистрация цифровых карт в системе MapInfo по элементам зарамочного оформления в системе координат навигационной карты. На следующем этапе проводилось районирование заливов. Этот этап – наиболее критичный в ходе расчета объемов водной массы, поскольку он вносит наибольшую долю субъективизма в процесс оценки. Районирование проводилось с учетом морфометрии озерной котловины и формы береговой линии: границы проводились через острова и озерные участки с наименьшей глубиной. Линии границ районов накладывались на растровые изображения карты.

Изолинии рельефа дна оцифровывались в виде полилиний, при этом изолинии определенной глубины сохранялись в отдельном файле (слое карты). Острова и луды, разме-

ром которых можно пренебречь по сравнению с площадью заливов, при расчете не учитывались. Береговая линия залива оцифрована как изолиния с нулевой глубиной. Граница залива в месте соединения с открытой частью озера, проходящая через открытое водное пространство, проводилась по наименьшему расстоянию между островами или через районы с минимальной глубиной. После оцифровки полилинии глубин были преобразованы в полигоны, что позволило вычислить их площадь. Затем полигоны были разделены на районы с помощью линий границ, определенных ранее, что позволило вычислить площадь каждой изобаты для конкретного района залива (рис. 1–3). Расчет площади полигонов проводился средствами системы MapInfo.

Далее с учетом площади полигонов и отметок изобат вычислялись объемы губ и их районов:

$$V = 10^{-3} \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n [(S_{i+1} + S_i)(H_{i+1} - H_i)], \quad (12)$$

где V – объем водной массы, км³; S_i – площадь, околтуренная i -й изобатой, км²; H_i – отметка i -й изобаты, м. В качестве n -й изобаты выступает следующая по счету отметка глубины с нулевой площадью.

С применением описанного выше метода определены основные гидрологические характеристики заливов Онежского и Ладожского озер, рассмотренные в статье (табл. 1).

ОЦЕНКА ВОДООБМЕНА ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Для оценки водообмена заливов по химическим показателям использовались многолетние данные о химическом составе воды Онежского и Ладожского озер [7, 8].

Средневзвешенные (на объем воды) показатели содержания консервативных компонентов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^-), а также $\sum_{\text{и}}$ и щелочность приточных вод Петрозаводской губы имеют значения, близкие к таковым для Онежского озера [7, 8].

Поэтому для расчета водообмена залива следует ориентироваться на гумусность воды и лабильные компоненты (Fe , Si , $\text{P}_{\text{общ}}$), поскольку приточные воды существенно отличаются от озерных по этим показателям (табл. 2). С учетом высокой проточности губы и незначительной трансформации веществ расчет периода

Таблица 1. Основные расчетные гидрологические характеристики заливов Онежского и Ладожского озер

| Водный объект, залив | Район губы | Объем водной массы, км ³ | Доля от объема губы, % | Средняя глубина, м |
|----------------------|------------------|-------------------------------------|------------------------|--------------------|
| Петрозаводская губа | Вершинный | 0.232 | 15 | 16.0 |
| | Центральный | 0.600 | 39 | 18.6 |
| | Внешний | 0.716 | 46 | 17.8 |
| | Общий объем губы | 1.548 | 100 | 17.8 |
| Кондопожская губа | Вершинный | 0.623 | 12 | 11.4 |
| | Центральный | 2.295 | 44 | 33.1 |
| | Внешний | 2.261 | 44 | 28.4 |
| | Общий объем губы | 5.179 | 100 | 25.5 |
| зал. Хиденселькя | Общий объем губы | 3.912 | 100 | 20.6 |

Таблица 2. Химический состав воды Петрозаводской губы по сезонам года, приточных вод и вод Онежского озера по результатам многолетних наблюдений

| Водный объект, объем водных масс, доля | Сезон | Hum | Fe _{общ} , мг/л | Si, мг/л | P _{общ} , мкг/л |
|--|-------|-----|--------------------------|----------|--------------------------|
| Вершинная часть губы ($\rho = 0.15$) | Зима | 42 | 0.68 | 1.86 | 30 |
| | Весна | 31 | 0.43 | 1.24 | 24 |
| | Лето | 18 | 0.23 | 0.38 | 19 |
| | Осень | 10 | 0.12 | 0.25 | 15 |
| | Год | 25 | 0.37 | 0.93 | 22 |
| Центральная часть губы ($\rho = 0.39$) | Зима | 26 | 0.32 | 1.40 | 23 |
| | Весна | 22 | 0.28 | 0.98 | 22 |
| | Лето | 14 | 0.15 | 0.26 | 15 |
| | Осень | 13 | 0.21 | 0.38 | 20 |
| | Год | 19 | 0.24 | 0.76 | 20 |
| Внешняя часть губы ($\rho = 0.46$) | Зима | 21 | 0.21 | 0.85 | 15 |
| | Весна | 21 | 0.20 | 0.64 | 18 |
| | Лето | 15 | 0.17 | 0.23 | 16 |
| | Осень | 12 | 0.11 | 0.24 | 14 |
| | Год | 17 | 0.17 | 0.49 | 16 |
| р. Шуя | Зима | 53 | 0.84 | 1.96 | 35 |
| | Весна | 42 | 0.68 | 1.93 | 30 |
| | Лето | 33 | 0.60 | 1.18 | 34 |
| | Осень | 27 | 0.99 | 0.85 | 42 |
| Средневзвешенная концентрация в губе | - | 19 | 0.23 | 0.66 | 18.5 |
| Средневзвешенная концентрация в губе без учета испарения | - | 19 | 0.23 | 0.65 | 18.0 |

Таблица 2. Окончание

| Объект, объем водных масс, доля | Сезон | Hum | Fe _{общ} , мг/л | Si, мг/л | P _{общ} , мкг/л |
|---|-------|-----|-----------------------------|-------------|-----------------------------|
| р. Шуя (среднегодовые) ($V_{\text{прит}} = 3.120 \text{ км}^3/\text{год}$, $\rho = 0.932$) | - | 39 | 0.78 | 1.5 | 35 |
| р. Неглинка ($V_{\text{прит}} = 0.016 \text{ км}^3/\text{год}$, $\rho = 0.005$) | - | 18 | 1.4 | 3.1 | 70 |
| р. Лососинка ($V_{\text{прит}} = 0.017 \text{ км}^3/\text{год}$, $\rho = 0.005$) | - | 29 | 1.1 | 2.5 | 50 |
| Осадки ($V_{\text{прит}} = 0.044 \text{ км}^3/\text{год}$, $\rho = 0.044$) | - | 3 | 0.05 | 0.03 | 17 |
| Ливневые и дренажные воды ($V_{\text{прит}} = 0.047 \text{ км}^3/\text{год}$, $\rho = 0.014$) | - | 32 | 1.5 | 3.2 | 140 |
| Подземные воды ($V_{\text{прит}} = 0.002 \text{ км}^3/\text{год}$, $\rho = 0.002$) | - | 3 | 0.3 | 2.8 | 17 |
| Средневзвешенный состав приточных вод ($V_{\text{прит}} = 3.246 \text{ км}^3/\text{год}$) | - | 38 | 0.80 | 1.5 | 37 |
| Онежское озеро | - | 11 | 0.05 | 0.30 | 9 |

внешнего водообмена можно выполнить по формуле (10) для консервативных веществ.

Периоды водообмена, рассчитанные по различным показателям, получились близкими: 0.13 по Si, 0.14 по гумусности, 0.11 по Fe_{общ} и 0.15 по P_{общ}. Средний период водообмена по всем показателям составил 0.13 года. На основании этого можно определить объем приточных вод (речных, атмосферных, подземных и озерных) в губу, который составит 11.9 км³/год, а объем стока с учетом испарения – 11.8 км³/год. Из этого следует, что в среднем за год водные массы губы представлены на 26% водами р. Шуи и на 74% – водами Онежского озера.

Среди всех исследованных заливов Петрозаводская губа выделяется наибольшими сезонными вариациями химического состава воды. В этой связи представляет интерес оценка внеш-

него водообмена по сезонам года. Средневзвешенный состав воды Петрозаводской губы по сезонам (табл. 3) рассчитан с допущением, что объем приточных вод постоянен и составляет 3.346 км³/год, а состав воды Онежского озера не изменяется в течение года. Полученные результаты показали, что максимальный период водообмена отмечается зимой и весной, а минимальный – летом и осенью (табл. 3).

Зимой водообмен губы с озером ограничен ледоставом, а весной – термобаром. Вследствие этого в зимне-весенний период показатели качества воды в губе больше соответствовали водам р. Шуи. Летом и осенью в результате гидродинамических процессов состав воды в губе наиболее схож с водами Онежского озера. Согласно вычисленным τ , зимой и весной водные массы губы только на 38–48% представлены во-

Таблица 3. Среднесезонные (по объему) показатели состава воды Петрозаводской губы и периоды ее водообмена (τ) по сезонам года

| Сезон, период водообмена | Hum | Fe _{общ} , мг/л | Si, мг/л | P _{общ} , мкг/л | τ , лет |
|--------------------------|------|--------------------------|----------|--------------------------|--------------|
| Зима | 26 | 0.32 | 1.2 | 20 | 0.24 |
| τ , лет | 0.25 | 0.17 | 0.34 | 0.19 | |
| Весна | 23 | 0.27 | 0.86 | 20 | 0.18 |
| τ , лет | 0.21 | 0.13 | 0.21 | 0.19 | |
| Лето | 15 | 0.17 | 0.26 | 16 | 0.08 |
| τ , лет | 0.07 | 0.08 | - | 0.09 | |
| Осень | 13 | 0.15 | 0.26 | 16 | 0.07 |
| τ , лет | 0.04 | 0.07 | - | 0.09 | |

дами Онежского озера, а летом и осенью их доля становится максимальной (82–86%).

Усредненные по сезонам значения τ , полученные как по отдельным показателям, так и по их совокупности, совпадают с ранее установленным периодом водообмена губы (0.13 года).

Результаты расчетов водообмена по химическим показателям подтверждаются сезонными вариациями изотопного состава воды (дейтерий и кислород-18) в Петрозаводской губе. На рис. 4 представлены результаты анализа изотопного состава воды озера в характерные периоды водного режима, а также притоков Петрозаводской губы (рек Шуя, Лососинка и Неглинка) относительно локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ). Первый период (конец мая – начало июня) совпадает со временем исчезновения термобара, второй период (сентябрь – начало октября) – со временем установления в озере гомотермии. Среднегодовой изотопный состав атмосферных осадков: $\delta^{18}\text{O} \approx -11.6\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} \approx -85\text{‰}$ – рассчитан с учетом объема выпадений в период регулярных наблюдений 2009–2014 гг. (ст. Петрозаводск). Следует отметить практически одинаковый изотопный состав воды в центральной части озера в раз-

ные сезоны года. Для озерных вод характерен довольно узкий диапазон вариаций изотопного состава (особенно $\delta^2\text{H}$). Изотопный состав озерных вод значительно “тяжелее” среднего изотопного состава атмосферных осадков за счет испарения с водной поверхности (рис. 4). В вертикальном разрезе водной толщи озера также не наблюдается значимых колебаний изотопного состава даже на самых глубоководных станциях Центрального Онего, что указывает на хорошее перемешивание воды.

Другая картина наблюдается в сезонном распределении изотопного состава в Петрозаводской губе. Весенние пробы воды здесь изотопически значительно легче осенних за счет поступления снеготалых вод с притоками (рис. 4). На графике рис. 4 отклонение точек от ЛЛМВ вправо свидетельствует о фракционировании изотопного состава воды за счет испарения [9]. Угловым коэффициентом уравнения регрессии, аппроксимирующего результаты изотопного анализа воды в губе в начале лета, близок к теоретическому значению и составляет 5.2 (рис. 4). Начальный изотопный состав воды в губе можно оценить по координатам точки пересечения этой линии с ЛЛМВ: $\delta^{18}\text{O} \approx -12.2$ и $\delta^2\text{H} \approx -88\text{‰}$ (рис. 4). Эти значения несколько меньше среднегодовой величины для атмосферных осадков, что говорит о преобладании озерной воды в водном балансе Петрозаводской губы в начале лета.

Осенние пробы в Петрозаводской губе очень близки по изотопному составу к пробам воды в Центральном Онего, что свидетельствует о высоком водообмене залива с озером в этот период. Таким образом, данные по изотопному составу воды Петрозаводской губы согласуются с ранее указанными сезонными особенностями ее водообмена с озером, установленному по химическим показателям.

ОЦЕНКА ВОДООБМЕНА КОНДОПОЖСКОЙ ГУБЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Для Кондопожской губы, как и для Петрозаводской, отмечается различие химического состава воды по отдельным ее участкам, и для нее не удастся выбрать консервативные показатели для расчета периода водообмена [7, 8]. Минерализация воды в Кондопожской губе близка к озерной (36 мг/л), несмотря на низкую минерализацию приточных речных вод (16.8 мг/л).

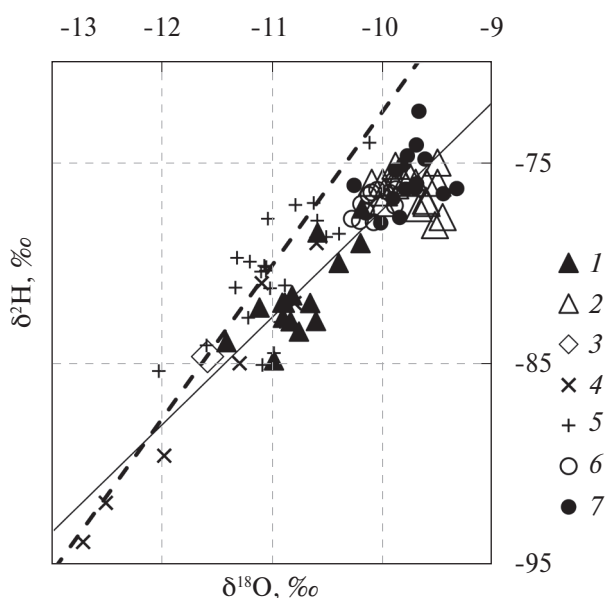


Рис. 4. Изотопный состав воды в Петрозаводской губе, ее притоках и в центральной части Онежского озера: 1 – Петрозаводская губа, начало лета; 2 – Петрозаводская губа, осень; 3 – атмосферные осадки, среднее; 4 – притоки в губу, начало лета; 5 – притоки в губу, осень; 6 – центральная часть озера, начало лета; 7 – центральная часть озера, осень. Пунктир – локальная линия метеорных вод, сплошная линия – аппроксимация точек июньских проб воды в губе ($y = 5.2x - 25$, $R^2 = 0.86$).

Это связано с влиянием минерализованных сточных вод Кондопожского промцентра. Для оценки водообмена губы можно использовать показатели содержания неконсервативных веществ ($P_{\text{общ}}$, Si, $Fe_{\text{общ}}$) с учетом их трансформации в приточных водах в течение года в соответствии с уравнением (11). За константы скорости трансформации веществ примем их средние значения для озер Карелии, полученные в работе [5] ($k_{\text{Si}} = 0.57 \text{ год}^{-1}$, $k_{\text{Fe}} = 0.78$, $k_{\text{Pобщ}} = 0.27 \text{ год}^{-1}$). Расчет средних концентраций вещества в губе выполнен по многолетним данным для трех районов губы: вершинной части (12% от объема губы), центральной (44%) и внешней (44%), примыкающей к центральному плесу Онежского озера (табл. 4).

Расчеты периода водообмена τ по различным показателям ($P_{\text{общ}}$, Si, $Fe_{\text{общ}}$) дали близкие значения: 1.15 по $P_{\text{общ}}$, 0.87 по Si, 1.05 по $Fe_{\text{общ}}$, τ составил в среднем 1.02 года. Полученная средняя величина τ в 1.9 раза меньше, чем отношение объема воды в губе к объему приточных вод. В целом водные массы Кондопожской губы представлены водами Онежского озера (47%), речными водами (49), атмосферными осадками (2), сточными (1) и подземными водами (0.2%).

Период водообмена τ можно оценить и по стоку из губы. Объем стока можно определить как сумму поступления приточных и озерных вод за вычетом испарения воды с водной поверхности (0.06 км³/год). В таком случае период водообмена по стоку составит 1.04 года.

ОЦЕНКА ВОДООБМЕНА ЗАЛИВА ХИДЕНСЕЛЬКЯ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Для воды зал. Хиденселькя следует учитывать четыре главных источника формирования химического состава: реки Тохмайоки и Янисйоки, Ладожское озеро и атмосферные осадки. Подземными водами, поступающими в залив с прибрежной зоны, в связи с их небольшими объемами можно пренебречь. Для определения τ залива воспользуемся данными многолетних наблюдений ИВПС КарНЦ РАН в северной части Ладожского озера и его притоках [7, 8], а также результатами гидрохимических съемок залива в 2012 г.

Воды всех объектов различаются по ионному составу и по сумме ионов $\Sigma_{\text{и}}$, мг/л:

зал. Хиденселькя:

$$\sum_{\text{и}} 54.6 \frac{\text{HCO}_3 \ 48 \ \text{SO}_4 \ 21 \ \text{Cl} \ 16 A_{\text{опр}} \ 8 \ \text{NO}_3 \ 3}{\text{Ca}53 \ \text{Mg}22 \ \text{Na}20 \ \text{K}4},$$

р. Тохмайоки:

$$\sum_{\text{и}} 47.2 \frac{\text{HCO}_3 \ 36 \ \text{SO}_4 \ 26 A_{\text{опр}} \ 24 \ \text{Cl} \ 13 \ \text{NO}_3 \ 2}{\text{Ca}53 \ \text{Mg}23 \ \text{Na}18 \ \text{K}6},$$

р. Янисйоки:

$$\sum_{\text{и}} 22.9 \frac{\text{HCO}_3 \ 32 \ \text{SO}_4 \ 29 A_{\text{опр}} \ 24 \ \text{Cl} \ 11 \ \text{NO}_3 \ 3}{\text{Ca}48 \ \text{Mg}27 \ \text{Na}19 \ \text{K}6},$$

Ладожское озеро:

$$\sum_{\text{и}} 62.7 \frac{\text{HCO}_3 \ 50 \ \text{SO}_4 \ 20 \ \text{Cl} \ 17 A_{\text{опр}} \ 10 \ \text{NO}_3 \ 3}{\text{Ca}53 \ \text{Na}23 \ \text{Mg}21 \ \text{K}6}.$$

Таблица 4. Объемы водных масс и исходные концентрации веществ в Кондопожской губе и основных источниках формирования ее водного и гидрохимического режима, по данным [8]

| Воды | Объем водных масс, км ³ | Концентрация | | |
|------------------------|------------------------------------|--------------------------|----------|--------------------------|
| | | $Fe_{\text{общ}}$, мг/л | Si, мг/л | $P_{\text{общ}}$, мкг/л |
| Вершинной части губы | 0.62 | 0.24 | 1.43 | 54 |
| Центральной части губы | 2.30 | 0.10 | 0.59 | 17 |
| Внешней части губы | 2.26 | 0.07 | 0.34 | 13 |
| Речные | 2.5 | 0.32 | 1.64 | 12 |
| Подземные | 0.01 | 0.41 | 6.10 | 20 |
| Осадки | 0.13 | 0.10 | 0.10 | 10 |
| Сточные | 0.05 | 0.60 | 3.20 | 1220 |
| Приточные | 2.68 | 0.31 | 1.59 | 36 |
| Кондопожской губы | 5.18 | 0.10 | 0.57 | 20 |
| Онежского озера | 291 | 0.05 | 0.30 | 9 |

Наименьшее содержание всех минеральных компонентов отмечается в воде р. Янисйоки. Следует отметить, что реки выделяются повышенной эквивалентной долей SO_4^{2-} , $\text{A}_{\text{орг}}$ и меньшей — HCO_3^- по сравнению с водой Ладожского озера.

Более разнообразны воды объектов по содержанию биогенных элементов. Например, содержание общего фосфора составляет: в зал. Хиденселькя — 19, в реках Тохмайоки — 32, Янисйоки — 14, а в Ладожском озере — 17 мкг/л. Еще большие отличия наблюдаются по содержанию органического вещества (ОВ) гумусовой природы, которое в основном обуславливает цветность воды. Так, среднее значение цветности воды Ладожского озера — 30, рек Тохмайоки — 120, Янисйоки — 70, в заливе — 37 град. Соответственно, меняется и содержание $\text{Fe}_{\text{общ}}$, мг/л: минимальное значение (0.06) отмечено в воде Ладожского озера, максимальное (1.04) — в р. Тохмайоки. Различия наблюдаются и по содержанию Si, $\text{P}_{\text{общ}}$ и Mn.

Для оценки доли вод, поступающих от различных источников, выберем наиболее надежно определяемые консервативные показатели, на величине которых не сказываются внутриводоемные процессы. Из всей совокупности данных по ионному составу наиболее подходят гидрокарбонаты и хлориды; в Ладожском озере: HCO_3^- — 28.4, Cl^- — 5.6; р. Тохмайоки: HCO_3^- —

17.4, Cl^- — 3.7; р. Янисйоки: HCO_3^- — 7.8, Cl^- — 1.6; зал. Хиденселькя: HCO_3^- — 24.7 (без учета испарения — 24.1), Cl^- — 4.9 (без учета испарения — 4.7) мг/л.

Проблема оценки водообмена зал. Хиденселькя заключается в том, что неизвестны объемы водных масс р. Янисйоки, поступающие в залив. Поэтому для расчета τ по формуле (10) будем использовать различный объем стока р. Янисйоки в залив (от 0 до 100% годового с шагом 0.11 км³/год; табл. 5) с учетом того, что приток р. Тохмайоки составляет 0.20 км³/год, а поступление атмосферных осадков — 0.11 км³/год.

Из табл. 5 следует, что при расчетах τ как по содержанию HCO_3^- , так и по Cl^- значения получаются близкие. Величина τ существенно зависит только от объема притока р. Янисйоки в залив. Так, при отсутствии притока τ составляет от 2.99 до 3.13 года, а при максимальном поступлении речной воды — 0.49 лет. Среднее значение τ составляет 1.12 (по HCO_3^-) и 1.14 (по Cl^-) лет, что соответствует годовому притоку р. Янисйоки в залив в объеме 0.44 км³, или 33% годового. Полученная средняя величина τ и объем притока р. Янисйоки в залив — реальные с учетом морфометрических особенностей зал. Хиденселькя. Период водообмена залива по стоку составляет 1.15 лет, и эта величина близка к τ по притоку в связи с малым испарением.

Таблица 5. Расчетные значения периода водообмена для различных объемов вод р. Янисйоки, поступающих в зал. Хиденселькя

| V , км ³ /год | $V_{\text{прит}}$, км ³ /год | $\tau_{\text{HCO}_3^-}$ | τ_{Cl^-} | $\tau_{\text{ср}}$ |
|----------------------------|--|-------------------------|----------------------|--------------------|
| 0 | 0.31 | 2.99 | 3.13 | 3.06 |
| 0.11 | 0.42 | 2.09 | 2.17 | 2.13 |
| 0.22 | 0.53 | 1.66 | 1.61 | 1.64 |
| 0.33 | 0.64 | 1.34 | 1.33 | 1.33 |
| 0.44 | 0.75 | 1.10 | 1.13 | 1.12 |
| 0.55 | 0.86 | 0.95 | 0.97 | 0.97 |
| 0.66 | 0.97 | 0.84 | 0.85 | 0.85 |
| 0.77 | 1.08 | 0.75 | 0.76 | 0.76 |
| 0.88 | 1.19 | 0.68 | 0.73 | 0.71 |
| 0.99 | 1.30 | 0.62 | 0.62 | 0.62 |
| 1.10 | 1.41 | 0.57 | 0.57 | 0.57 |
| 1.21 | 1.52 | 0.52 | 0.53 | 0.53 |
| 1.32 | 1.63 | 0.49 | 0.49 | 0.49 |
| Средние | - | 1.12 | 1.14 | 1.13 |

Принимая в качестве расчетного среднее значение τ , получим, что водные массы в заливе представлены на 6% водами р. Тохмайоки, на 3% – атмосферными осадками, на 13% – водами р. Янисйоки и на 78% – Ладожскими водами.

ВЫВОДЫ

Предложена методика оценки внешнего водообмена заливов по химическим показателям воды. В методике используются данные по химическому составу воды заливов и источников его формирования, по которым можно определить внешний водообмен заливов с учетом поступления воды из озера. В общем случае для расчета водообмена следует использовать показатели содержания консервативных веществ, концентрации которых существенно различаются в приточных водах и водах заливов. В случае, когда использование содержания консервативных веществ не представляется возможным, для высокопроточных заливов ($\tau < 2$ мес.) можно использовать данные по содержанию лабильных веществ (ОВ, $Fe_{\text{общ}}$, Si, $P_{\text{общ}}$ и др.) без учета их трансформации. Для заливов с замедленным водообменом ($\tau \geq 2$ мес.) при использовании в расчетах неконсервативных компонентов необходимо учитывать их трансформацию в водах заливов.

Описанная методика апробирована на примере трех заливов – Петрозаводской и Кондопожской губ Онежского озера и зал. Хиденселькя Ладожского озера. Все заливы существенно различаются между собой по гидрологическим характеристикам и по химическому составу как собственных, так и приточных вод. На их примере продемонстрированы три основных случая применения предложенной методики: на примере зал. Хиденселькя – расчет на основе консервативных элементов, Петрозаводской губы – использование неконсервативных элементов для расчета водообмена губы с малым водообменом, Кондопожской губы – неконсервативных элементов с учетом их трансформации в воде залива. Также на примере Петрозаводской губы, для которой наблюдается наибольшая вариабельность химического состава воды в течение года, рассмотрен сезонный аспект изменения внешнего водообмена. Показано, что внешний водообмен губы существенно замедлен в зимний и весенний периоды. Расчетные данные, полученные предлагаемым методом, качественно подтверждены результатами исследования изотопного состава воды.

Для Петрозаводской губы установлено, что период с учетом внешнего водообмена составляет 0.13, для Кондопожской губы – 1.02, для зал. Хиденселькя – 1.13 года. При этом с учетом только приточных вод и без учета внешнего водообмена период составляет для Петрозаводской губы 0.38, для Кондопожской – 2 года. Таким образом, можно заключить, что определение периода водообмена заливов без учета их внешнего водообмена с озером существенно занижает его скорость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бородулина Г.С.* Роль подземного стока в формировании химического состава поверхностных вод Карелии // Тр. КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 108–116.
2. *Грицевская Г.Л.* Гидрография бассейна р. Суна // Тр. СевНИИГМ. “Вопросы гидрологии, озероведения и водного хозяйства Карелии”. 1965. Вып. 23. С. 236–259.
3. *Знаменский В.А.* Влияние гидрологических и гидродинамических факторов на изменение концентрации химических веществ в водохранилищах Волжского каскада // Матер. Всесоюз. науч. конф. по проблеме комплексного использования и охраны водных ресурсов бассейна Волги. Пермь, 1975. Вып. 2.
4. *Китаев А.Б.* Методы оценки внешнего водообмена водохранилищ // Географ. вестн. 2005. Вып. 1–2. С. 73–81.
5. *Лозовик П.А., Рыжаков А.В., Сабылина А.В.* Процессы трансформации, круговорота и образования веществ в природных водах // Тр. КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 21–28.
6. *Румянцев В.А., Рыбакин В.Н., Токарев И.В.* Распространение вод притоков и подземных вод в Ладожском озере по данным изотопных индикаторов // Уч. зап. РГГМУ. СПб.: РГГМУ, 2017. Вып. 48. С. 94–109.
7. Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1998. 188 с.
8. Состояние водных объектов Республики Карелия по результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2007. 209 с.
9. *Ферронский В.И., Поляков В.А.* Изотопия гидросферы Земли. М.: Науч. мир, 2009. 632 с.
10. *Флейшман Д.Г., Горин В.Д.* Оценка времени обмена водных масс по содержанию космогенного радионуклида ^{23}Na // Современное состояние экосистемы Ладожского озера. Л., 1987. С. 62–68.
11. *Штефан В.Н.* Водообмен водохранилищ Волжско-Камского каскада // Комплексные исследования

- водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1980. Вып. 5. С. 46–55.
12. Эдельштейн К.К. Водные массы долинных водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1991. 176 с.
13. Эдельштейн К.К. Водообмен и течение // Комплексные исследования водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1979. Вып. 3.
14. Эдельштейн К.К. О соотношении показателей водообмена долинных водохранилищ // Вод. ресурсы. 1981. № 6. С. 70–74.
15. Gibson J.J., Birks S.J., Yi Y. Stable isotope mass balance of lakes: a contemporary perspective // Quaternary Sci. Rev. 2016. V. 131. P. 316–328.
16. Jasechko S., Gibson J.J., Edwards T.W.D. Stable isotope mass balance of the North American Great Lakes // J. Great Lakes. 2014. Res. 40. P. 336–346.
17. Tikhomirov V.V. Hydrogeochemistry Fundamentals and Advances. Environ. Analysis of Groundwater // John Wiley & Sons. 2018. V. 3. 498 p. ISBN 9781119160533

EFFECTS OF EXTERNAL WATER EXCHANGE BETWEEN BAYS OF LAKES ON CHEMICAL INDICATORS OF WATER

P. A. Lozovik¹, M. B. Zobkov^{1,*}, G. S. Borodulina¹, I. V. Tokarev²

¹ Northern Water Problems Institute, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, 185030 Russia

² Resource Center of X-ray Diffraction Research Methods, Science Park of the St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199155 Russia

*E-mail: duet@onego.ru

Received: 13.03.2016

Received version received: 23.12.2017

Accepted: 26.12.2017

External water exchange between bays of Onega (Petrozavodskaya and Kondopozhskaya bays) and Ladoga (Hijdenselga gulf) lakes was estimated according to chemical compositions, water inflows, and runoff volumes in bays. Periods of water exchange in Petrozavodskaya bay, Kondopozhskaya bay, and Hijdenselga gulf were 0.13, 1.02, and 1.15 years, respectively. Under these conditions, water exchange was 2–3 times higher than that calculated without considering the inflow of lake waters. Water exchange in the Petrozavodskaya bay was confirmed by seasonal variations in isotope compositions.

Key words: external bay water exchange, Onega Lake, Ladoga Lake, Hijdenselga gulf, Petrozavodskaya bay, Guba, Kondopozhskaya bay, chemical and isotope composition.

DOI: 10.31857/S0321-059646191-101