

| Период | $T_a$<br>°C | $P_{smf}$ | $P_r$ | $E_{wp}$ | $E_{sp}^*$ | $Y_{sf}$ | $G(p)$      | $G(n)$ | $G(c)$ | $G(d)$ | $G(k)$ | $G(o)$ |
|--------|-------------|-----------|-------|----------|------------|----------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|        |             | мм        |       |          |            |          | мг/(сут·м²) |        |        |        |        |        |
| VII    | 19.0        | 0         | 77    | 0        | 109        | 0.1      | 0.07        | 68     | 325    | 75     | 39     | 61     |
| VIII   | 17.1        | 0         | 49    | 0        | 82         | 0.0      | 0.05        | 87     | 447    | 90     | 40     | 53     |
| IX     | 9.8         | 0         | 54    | 0        | 41         | 0.0      | 0.01        | 73     | 392    | 67     | 37     | 76     |
| X      | 3.4         | 2         | 37    | 3        | 15         | 0.0      | 0.08        | 67     | 302    | 81     | 52     | 26     |
| XI     | -7.7        | 6         | 10    | 5        | 1          | 0.0      | 0.15        | 90     | 398    | 49     | 53     | 83     |
| XII    | -14.2       | 0         | 0     | 4        | 0          | 0.0      | —           | —      | —      | —      | —      | —      |
| Год    | 2.2         | 155       | 348   | 36       | 502 (432)  | 0.8      | —           | —      | —      | —      | —      | —      |

Примечание:  $T_a$  – температура атмосферного воздуха на метеостанции Томск;  $Y_{sf}$  – сток малого водотока по данным измерений; расчетные значения:  $P_{smf}$  – водоотдача из снежного покрова;  $P_r$  – дождь;  $E_{wp}$  – испарение с поверхности снега;  $E_{sp}^*$  – испарение с открытой поверхности водосбора (без снега) с учетом поправки в предположении, что подземный сток и изменение влагозапасов в водосборе стремятся к нулю; 432 мм – с поправкой на предполагаемую инфильтрацию;  $G$  – вынос по водотоку (р) и поступление минеральных солей с атмосферными осадками на квадратный метр в сутки на пойме (п), картофельном поле (о), под сосной (с), дубом (д) и калиной (к)

**Выводы.** Выявлено, что растительный покров оказывает значимое влияние на состав атмосферных осадков, которые поступают на земную поверхность, что необходимо учитывать при оценке элементов геохимического баланса территорий. Многообразие гидрологических и геохимических процессов в агроландшафте приводит к тому, что статистически значимые связи между «входным» воздействием на водосбор и гидрохимическим стоком малого водотока в расчетном створе практически отсутствуют; имеется лишь общее повышение значений тех или иных геохимических показателей.

Работа выполнена за счет средств гранта РНФ № 23–27–00039.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Методика расчета водохозяйственного баланса водных объектов. – М.: МПР России, 2007. – 41 с.
2. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:200000 / отв. ред. Э.К. Буренков. – М.: ИМГРЭ, 2002. – 92 с.
3. Пасечник Е.Ю., Гусева Н.В., Савичев О.Г., Лыготин В.А., Балобаненко А.А., Домаренко В.А., Владимирова О.Н. Микроэлементный состав подземных вод верхней гидрогеодинамической зоны в бассейне Верхней Оби как фактор формирования их эколого-геохимического состояния // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 4. 54–63. DOI 10.18799/24131830/2020/4/2593.
4. Савичев О.Г. Гидроэкологическое обоснование водохозяйственных решений: монография. – Томск: Изд-во ТПУ, 2021. – 166 с. <https://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2021/m63.pdf>
5. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage. Water Resources, Development and Management Service FAO, 1998, no. 56, pp. 1–276.

## ЭЛЕМЕНТЫ УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА МЕЗОТРОФНОГО ОЗЕРА МЯСТРО (НАРОЧАНСКИЕ ОЗЕРА, БЕЛАРУСЬ)

## THE CARBON BALANCE ELEMENTS OF MESOTROPHIC LAKE MYASTRO (NAROCH LAKES, BELARUS)

**Ю. К. Верес, Б. В. Адамович**

**Y. K. Veres, B. V. Adamovich**

Белорусский государственный университет, БГУ

г. Минск, Республика Беларусь

[veres.julia.naroch@gmail.com](mailto:veres.julia.naroch@gmail.com)

Belarusian State University, BSU

Minsk, Republic of Belarus

Круговорот углерода, как основного элемента органического вещества, является одним из ключевых факторов функционирования водных экосистем земного шара. Однако изучение пресноводных экосистем в этом направлении развито слабо. Мезотрофное озеро Мястро входит в состав Нарочанской группы озер и имеет богатую историю гидробиологических наблюдений. Результаты этих наблюдений, а также

специально выполненные исследования легли в основу составления углеродного баланса экосистемы озера, а также определения количественного вклада каждого элемента баланса в общий бюджет углерода водоема. В годовом цикле озеро Мястро аккумулирует углерод из внешней среды, объем накопления составляет 605,85 т С или 46,2 г С/м<sup>2</sup>/год. Основной путь поступления углерода в экосистему озера Мястро – полупогруженная растительность.

Carbon cycle as organic matter's main element is main of the key factors of aquatic ecosystems functioning in a global scale. Besides, researches of freshwater ecosystems in this field are weak. Lake Myastro is a part of Naroch lake system and has mesotrophic level. It has long history of hydrobiological researches. These results and special investigations formed the basis for compiling the carbon balance of the lake's ecosystem, as well as determining the quantitative contribution of each element of the balance to the total carbon budget of the waterbody. In the annual cycle, Lake Myastro accumulates carbon from the environment, the accumulation volume is 605,85 t C or 46,2 g C/m<sup>2</sup>/year. Submerged plants are the main route of carbon input into the ecosystem of the lake Myastro.

*Ключевые слова:* Нарочанские озера, трофический статус, парниковые газы, макрофиты, органический углерод, цикл углерода, притоки.

*Keywords:* Naroch lakes, trophic status, greenhouse gases, macrophytes, organic carbon, carbon cycle, tributaries.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2024-2-158-161>

В последние годы особенную актуальность приобрела проблема изучения углеродного цикла, в связи с анализом многочисленных данных о существенных изменениях в атмосфере Земли и влиянии на эти процессы парниковых газов, основным из которых является диоксид углерода. При этом основное внимание при изучении водных объектов было сконцентрировано на углеродном цикле Мирового океана, занимающего 70 % поверхности планеты. Исследований, посвященных озерным экосистемам, занимающим около 2 %, значительно меньше. Однако в отдельных областях, где озера могут составлять 10–20 % общей площади, углеродный обмен является значимым компонентом углеродного цикла. Так в Национальном парке «Нарочанский» озера занимают 19 % территории и являются структурообразующим элементом региона.

Для определения роли озерной экосистемы в углеродном цикле и направленности происходящих в них процессов трансформации и потоков углерода наиболее эффективным, но при этом крайне трудозатратным, является подход, предполагающий составление общего баланса углерода в экосистеме озера, т. е. учет всего попадающего в озеро углерода и выходящего из него. Этот подход дает наиболее полную и всеобъемлющую оценку потоков углерода в озерной экосистеме, но при этом требует проведения огромного количества исследований всевозможных процессов, имеющих отношений к углеродному циклу (количество поступающего углерода с водосбора, поступающего с осадками, органическим загрязнением, стока из атмосферы, и выходящего в результате газообмена, вылова рыбы и т. д.), причем эти исследований должны быть проведены в течение годового цикла.

Таким образом, несмотря на достаточно хорошую изученность отдельных звеньев углеродного цикла, углеродный баланс в лимнических системах разного геоморфологического и трофического типа является одним из главных вопросов на современном этапе развития лимнологии и гидроэкологии. Комплексные исследования углеродного баланса в конкретно взятых водоемах являются существенным вкладом в развитие современной теории функционирования водных экосистем.

Проводимые на Нарочанских озерах многолетние наблюдения, с учетом полученных в последние годы данных о сезонной продукции планктона, седиментации взвешенного и органического вещества, количественному учету полупогруженных макрофитов и т. д., дают возможность сконцентрироваться на исследованиях, необходимых для составления углеродного баланса, но не проводившихся в Нарочанских озерах ранее, либо проводившихся давно и не позволяющих использовать эти данные для составления баланса – вклад ручьевого стока и атмосферных осадков в углеродный баланс водоема, анализ депонирования углерода в погруженных макрофитах и седиментах и т. д.

В настоящей статье представлены этапы изучения углеродного цикла на примере одного из модельных водоемов для изучения широкого круга гидроэкологических проблем – оз. Мястро. Общая схема углеродного баланса экосистемы оз. Мястро может быть представлена в соответствии с рисунком 1.

На схеме представлены наиболее значимые потоки углерода оз. Мястро. Поступления углерода в озеро с листовым опадом и пылью, а также с водными животными (земноводными и птицами) и вынос углерода из озера естественным путем (без участия человека), обусловленный вылетом имаго насекомых и миграцией на сушу взрослых стадий земноводных, изъятием органического вещества с пищей птицами и другими животными, должны быть невелики и примерно уравновешены и не должны существенно повлиять на общий углеродный баланс озера.

В ходе комплексной работы коллектива гидробиологов биологического факультета БГУ за период 2016–2020 гг. были установлены и рассчитаны количественные значения основных элементов углеродного баланса оз. Мястро (рис. 2).



Рисунок 1 – Основные потоки углерода, связанные с внешней средой, в оз. Мястро

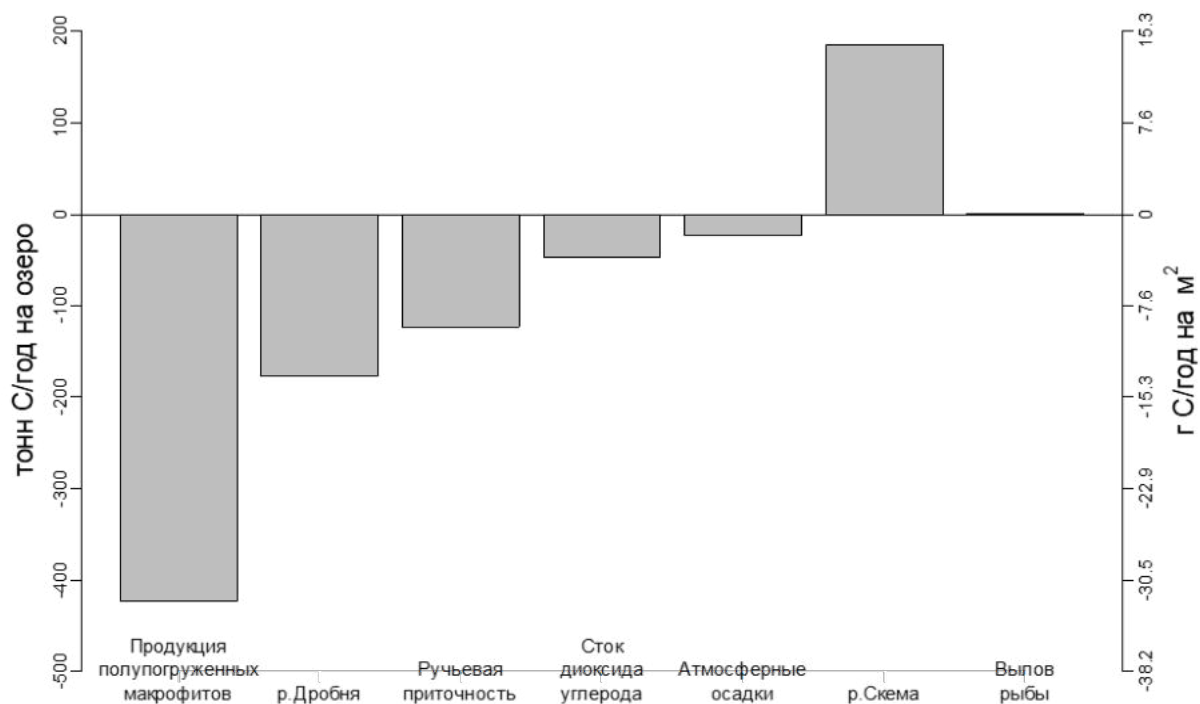


Рисунок 2 – Элементы баланса углерода в оз. Мястро

**Потоки диоксида углерода и метана** через поверхность водоема оценены методом закрытых камер в рамках НИР, выполненной на модельных водных объектах лабораторией инструментальной диагностики природных систем и объектов ГНПО «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам». Инструментальные измерения эмиссии и стоков диоксида углерода на Нарочанском полигоне осуществляли методом закрытых камер в вегетационные периоды 2016–2018 гг. В период ледостава на озерах эмиссия газов приравнивалась к нулю. По полученным данным, суммарный баланс потоков углерода в виде газов через поверхность воды в озере Мястро был сдвинут сторону стока и составил 31,9 т С/год. Основную роль в стоке углерода принадлежала пелагиали (30,7 т С/год).

**Притоки и вытекающие водотоки.** Содержание органического вещества в ручьевом стоке оценивалось по данным ежемесячных наблюдений во время вегетационного сезона (апрель–октябрь) в 2017 г. на восьми водотоках оз. Мястро. Среднесезонное значение составило  $22,24 \pm 11,27$  мг С/л. Ввиду отсутствия современных данных по водному балансу оз. Мястро, для расчетов были использованы последние имеющиеся в литературе

сведения [1]. Внешнее поступление органического вещества с водосборной территории в оз. Мясро составило 299,5 т С/год, т. е. 22,9 г С/м<sup>2</sup>·год.

**Атмосферные осадки.** Для оценки вклада атмосферных осадков во внешнее поступление органического вещества в озера Нарочь, Мясро и Баторино проводился мониторинг за основными гидрохимическими показателями режима углерода (общее содержание органического вещества, активная реакция среды (рН) и общая минерализация воды, определяемая по электропроводности) в пробах снега и дождя. Отбор проб проводили в 2016–2019 гг. на территории Нарочанская биологическая станция им. Г.Г. Винберга БГУ с помощью специально оборудованной площадки для сбора атмосферных осадков. Принимая во внимание, что атмосферные осадки составляют в приходной части водного баланса оз. Мясро 32,0 %, учет данного источника поступления в балансе углерода водоема представляется необходимым. По полученным данным среднее содержание органического вещества в атмосферных осадках региона составило  $2,34 \pm 1,78$  мг С/л. С учетом среднегодового объема осадков, выпадающих на акваторию оз. Мясро, составляющую 9,7 млн м<sup>3</sup>, в экосистему водоема поступает 11,5 т С в год.

**Макрофиты.** Количество углерода, поступающего путем ассимиляции из воздуха полупогруженными макрофитами и последующего его поступления в воду при отмирании надводных частей макрофитов, было оценено по суммарной чистой сезонной продукции полупогруженных макрофитов озера. Чистая продукция за сезон, т. е. количество органического вещества, которое непосредственно поступит в озеро после отмирания надводной части, принималось равным биомассе в период максимальной вегетации. Натурные измерения и оценки проводились в 2017 году.

Оз. Мясро характеризуется умеренным зарастанием, с обильным развитием растительности в районах мысов и полуостровов. По данным пространственной съемки, заросли воздушно-водной растительности вдоль береговой линии часто не образуют сплошной зоны, размещаясь участками различной величины и густоты от уреза воды до глубины 1,5–1,8 м. По данным 2017 г. в год в озеро поступает 938,09 т отмирающих побегов макрофитов в расчете на воздушно-сухую массу. Учитывая, что воздушно-сухая масса составляет по нашим данным 90 % от абсолютно сухого веса, а среднее содержание углерода в абсолютно сухом весе составляет 50 % [2], в оз. Мясро в год поступает 422,7 т или 32,3 г С/м<sup>2</sup>·год с продукцией воздушно-водных макрофитов. Изъятия биомассы макрофитов на оз. Мясро не ведется.

**Вылов рыбы.** Если принимать во внимание антропогенное вмешательство, то в балансе следует еще учесть изъятие углерода из экосистемы озера с выловом рыбы. По данным за 2017 г. [3] промысловый вылов рыбы из оз. Мясро составил 29,36 ц. Любительский вылов рыбы оцененный в 2011 г. [4], составляет ежегодно еще 37 ц. Учитывая, что содержание органического вещества в пресноводной рыбе составляет около 20 % [5], и 2,15 мг органических веществ соответствует 1 мг углерода, из озера с выловом рыбы выносятся 0,62 т углерода в год или 0,05 г С/м<sup>2</sup>·год.

Таким образом, в озере Мясро приходная часть баланса составляет 792,12 т или 60,5 г С/м<sup>2</sup>·год, расходная часть – 185,65 т или 14,2 г С/м<sup>2</sup>·год. Объем аккумулированного за год углерода составляет 605,85 т или 46,2 г С/м<sup>2</sup>·год. Аккумуляция органического вещества составляет 76 % внешнего поступления. Если в балансе не учитывать углерод, изымаемый из экосистемы с любительским выловом рыбы, то объем аккумулированного за год углерода в оз. Мясро составляет 606,47 т или 46,3 г С/м<sup>2</sup>·год. Аккумуляция углерода из воздуха воздушно-водными растениями и последующее его попадание в водную толщу при отмирании побегов, является основным путем вноса углерода в экосистему оз. Мясро.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жукова, Т.В. Роль биогенных веществ в биотическом круговороте и евтрофировании Нарочанских озер : автореф. дис... канд. биол. наук. : 03.00.18 / Т.В. Жукова ; Ин-т гидробиологии АН УССР – Киев, 1987. – 23 с.
2. Распопов, И.М. Фитомасса и продукция макрофитов Онежского озера / И.М. Распопов // Микробиология и первичная продукция Онежского озера. / под. ред. И.И. Николаева. – Л., 1973. – Гл. 10. – С. 123–142.
3. Бюллетень экологического состояния озер Нарочь, Мясро, Баторино (2017 год) / Т.В. Жукова [и др.]; под общей редакцией Т.М. Михеевой. – Мн.: БГУ, 2018. – 119 с.
4. Бюллетень экологического состояния озер Нарочь, Мясро, Баторино (2011 год) / А.П. Остапеня [и др.]; под общей редакцией А.П. Остапени. – Мн.: БГУ, 2012. – 103 с.
5. Биохимический состав тела сеголетков форели / М.В. Книга., Я.И. Шейко, М.Н. Тютюнова, Л.М. Вашкевич, Д.А. Микелевич, Е.В. Таразевич, Е.П. Глеб, Е.С. Гук // Вопросы рыбного хозяйства Беларуси : сборник научных трудов / РУП «Институт рыбного хозяйства» РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству». – Минск, 2007. – Вып. 23. – С. 69–74.