

## СТАТЬИ

УДК 556:574

**ВЛИЯНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
РЕКИ РОГАТКА (ОСТРОВ САХАЛИН)  
НА ПЕРВИЧНУЮ ПРОДУКЦИЮ, ПОГЛОЩЕНИЕ  
И ЭМИССИЮ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА РЕЧНОЙ ЭКОСИСТЕМОЙ\***

**Латковская Е.М., Репина М.А., Пестова А.О.**

*ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет», Южно-Сахалинск,  
e-mail: elena-sazon02@yandex.ru*

На примере р. Рогатка – малого водотока, расположенного в южной части о. Сахалин, изучили гидролого-гидрохимические параметры и оценили величину валовой первичной продукции и деструкции органического вещества отдельно для планктонного сообщества и перифитона в весенний период. В р. Рогатка величина деструкции органического вещества почти в 3 раза выше, чем продукции. Органическое вещество имеет преимущественно аллохтонное происхождение. Ведущую роль как в создании, так и в деструкции ОВ в реке играет перифитон. Ежегодно величина валовой первичной продукции автотрофов в р. Рогатка может ориентировочно достигать 1,2 т С, количество органического вещества, потребляемого планктонным и перифитонным сообществом, – 3,3 т С. Расчеты показали, что поглощение из атмосферы CO<sub>2</sub> р. Рогатка составляет порядка 44 тыс. т CO<sub>2</sub>/год или 12 тыс. т С/год. Сток CO<sub>2</sub> с 1 м<sup>2</sup> поверхности р. Рогатка за счет дегазации составляет ориентировочно 14,59 гС/м<sup>2</sup> в год или 53,5 гCO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup> в год (без учета гидробиологических процессов разложения и создания органического вещества), что составит порядка 0,4 тС в год, что в пересчете на CO<sub>2</sub> около 1,6 тCO<sub>2</sub>/год. Эмиссия CO<sub>2</sub> с 1 м<sup>2</sup> поверхности р. Рогатка за счет физико-химических процессов разложения и создания органического вещества), что составит порядка 0,4 тС в год, что в пересчете на CO<sub>2</sub> около 1,6 тCO<sub>2</sub>/год. Полученные предварительные объемы поглощения и эмиссии углекислого газа, продукции и деструкции органического вещества малого водотока о. Сахалин позволят провести дальнейшие расчеты поглощения и эмиссии CO<sub>2</sub> поверхностными водами острова и скорректировать текущие оценки.

**Ключевые слова:** о. Сахалин, р. Рогатка, гидрохимические параметры, первичная продукция, деструкция, органический углерод, фитопланктон, перифитон, трофность, потоки углекислого газа

*\*Работа частично выполнена в рамках государственного задания ФГБОУ ВО «СахГУ» по теме «Углеродный баланс биоморфолитосистем побережья и прилегающих морских акваторий окраинных морей Дальнего Востока (FEFF-2022-0027)».*

**INFLUENCE OF HYDROCHEMICAL CONDITIONS  
OF THE ROGATKA RIVER (SAKHALIN ISLAND)  
ON THE ON PRIMARY PRODUCTION AND CARBON DIOXIDE FLUX**

**Latkovskaya E.M., Repina M.A., Pestova A.O.**

*Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, e-mail: elena-sazon02@yandex.ru*

We studied the hydrological and hydrochemical parameters and estimated the value of the gross primary production (GPP) and destruction of organic matter (OM) separately for the plankton and periphyton in the small river. Rogatka (Sakhalin, Far East, Russia). The value of destruction of OM is almost 3 times higher than the products. OM is predominantly of allochthonous origin. The value of the GPP of autotrophs in the river approximately 1.2 tC annually, the amount of organic matter consumed by plankton and periphyton is about 3.3 tC annually. River absorption from the atmosphere of CO<sub>2</sub> is about 44 thousand tCO<sub>2</sub>/year or 12 thousand tC/year. The sink of CO<sub>2</sub> per m<sup>2</sup> of the surface of the river due to degassing is approximately 14.59 gC/m<sup>2</sup> year or 53.5 gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> year (excluding hydrobiological processes of decomposition and creation of organic matter), which will be about 0.4 tC/year or 1.6 tCO<sub>2</sub>/year. Emission of CO<sub>2</sub> per m<sup>2</sup> of the surface of the river due to physical and chemical processes is approximately 14.59 gC/m<sup>2</sup> year or 53.5 gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> year (excluding hydrobiological processes). It will be about 0,4 tC per year, which in terms of CO<sub>2</sub> is about 1.6 tCO<sub>2</sub>/year from hole river. The obtained preliminary volumes carbon dioxide flux, production and destruction of organic matter of the small river form Sakhalin will allow further calculations of absorption and emission of CO<sub>2</sub> by the surface waters of the island and correct current estimates.

**Keywords:** Sakhalin Island, Rogatka river, hydrochemical parameters, primary production, destruction, organic carbon, phytoplankton, periphyton, trophic, carbon dioxide flux

Оценка экологического состояния малых рек и ручьев (малые водотоки) о. Сахалин крайне важна, поскольку большинство таких водотоков имеет нерестовое значение для многих ценных видов рыб, включая тихоокеанских лососей. Наряду с чистотой, важный аспект водотока, как среды обита-

ния гидробионтов, является его трофность. В результате региональных особенностей малых нерестовых лососевых водотоков о. Сахалин, в зимний период достигается наилучшая выживаемость икры и молоди тихоокеанских лососей в нерестовых буграх за счет низкой продуктивности, небольшого

содержания органических веществ в воде и грунте, взвешенных веществ в воде и тонких фракций в грунте, высокого содержания кислорода, хорошей омываемости бугров и т.д. В реках и ручьях (участках рек) с каменистым руслом, достаточно высокими скоростями течения 0,1–5 м/с, характеризующихся снеговым или дождевым питанием, главным автотрофным продуцентом органического вещества является перифитон, тогда как продукция фитопланктона мало значительна [1–3]. Кроме того, лентические системы являются стоком углекислого газа в атмосферу, в отличие от озерных и океанических экосистем, которые, наоборот, в большей степени поглощают углерод [4–6] и изучение трансформации баланса углерода на разделе вода – атмосфера вдоль речного континуума, начиная от истоков до устья рек, имеет большое значение [7–9]. Величина эмиссии CO<sub>2</sub> более изменчива в водотоках арктического и умеренного пояса, чем субтропического и тропического [10]. Сток CO<sub>2</sub> в атмосферу из текущих водотоков всего мира варьируются от 0,8 до 2,3 PgC/в год в пересчете на углерод [11].

Таким образом, оценка элементов биогеохимического цикла углерода в таком водотоке для о. Сахалин важна для понимания общего баланса потока парниковых газов на региональном уровне. Большинство малых водотоков о. Сахалин в верхнем и среднем течении по гидрологическим характеристикам относят к предгорному типу, поэтому перифитон будет определяющим первичную продукцию экосистемы реки компонентом, а фитопланктон – вспомогательным, а полученные оценки поглощения и эмиссии углекислого газа в дальнейшем можно применять и для других водотоков подобного типа.

Цель исследования состоит в оценке влияния гидрохимических параметров р. Рогатка на первичную продукцию фитопланктона и фитоперифитона, определение трофического статуса водотока и расчет потоков углекислого газа через речную экосистему.

#### Материалы и методы исследования

Река Рогатка – левый приток второго порядка, впадает в р. Красносельскую, которая, в свою очередь, впадает в р. Сусуя. Река Рогатка протекает по территории Южно-Сахалинска, на ней обустроено водохранилище (площадь водного зеркала 0,09441 км<sup>2</sup>) для хозяйственно-питьевого водоснабжения города. Длина около 10 км, площадь во-

досбора 43 км<sup>2</sup>, имеет 14 притоков длиной менее 10 км [12]. Прилегающая местность гористая, густо поросшая смешанным лесом с преобладанием хвойных пород. Средняя высота водосбора составляет 390 м. Среднезвешенный уклон русла – 69%. Ширина долины по дну 100–150 м, грунты преимущественно суглинистые, местами обнажены известняковые горные породы, растворимость которых возрастает с уменьшением pH воды. Питание – смешанное с преобладанием снегового. Лед устанавливается во второй декаде декабря, начало весеннего ледохода в первой декаде апреля. Сплошного ледового покрова на реке не образуется. Ширина русла – 3–10 м, глубина реки – 0,2–0,5 м, скорость течения 1–2 м/с, среднегодовой расход воды невелик и составляет всего 0,52 м<sup>3</sup>/с, среднегодовой модуль стока – 27,4 л/с\*км<sup>2</sup>. Средний слой стока 863 мм, на весну (апрель – июнь) приходится 50,6%. Температура воды в реке не превышает 12 °С в течение года [12, 13]. Годовая сумма осадков по метеостанции г. Южно-Сахалинск составляет 822 мм, из которых в холодный период с ноября по март выпадает 263 мм, в теплый период – 559 мм. Мутность в течение года изменяется от 383 до 7226 мг/дм<sup>3</sup> (в среднем 2866 мг/дм<sup>3</sup>) [14].

Химический состав воды р. Рогатка характеризуется выраженным преобладанием катионов Ca<sup>2+</sup> (7,6–8 мг/л в половодье и 9–16 мг/л в межень) и анионов HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (27–32 мг/л в половодье и 33–49 мг/л в межень). Суммарная концентрация ионов составляет 55–59 мг/л в период половодья и 59–88 – в меженный период. Минерализация невысокая и не превышает 100 мг/л [13].

Река Рогатка является нерестовой для тихоокеанских лососей (горбуша, кета), хотя проход на все нерестилища невозможен из-за зарегулированности русла водохранилищем.

Пробы воды, фитопланктона и перифитона отбирали весной (март – апрель) 2021 г. на пяти станциях (рис. 1). Конечно, в толще воды текущих водотоков наряду с микроводорослями присутствуют гетеротрофные организмы, поэтому понятие фитопланктон здесь весьма условное. Тем не менее в дальнейшем мы будем придерживаться именно такого определения.

Станция № 1 – располагается на территории Городского парка. Ширина русла 2 м, берега укреплены каменной наброской, которая частично смыта в русло. Глубина 5 см у берега, 20 см – на середине водотока. Каменная наброска обросла перифитоном.



Рис. 1. Схема и фото станций

Станция № 2 – располагается на территории Городского парка западнее на 200 м станции № 1. Ширина русла 3 м. Дно состоит из валунов и камней, обросших перифитомом, глубина у берега 6 см, посередине 15 см.

Станция № 3 – располагается на территории Городского парка западнее на 200 м станции № 2. Ширина русла в месте отбора проб 1,5 м. Дно состоит из камней, перифитон на которых слабо развит. Глубина в месте отбора проб 11 см.

Станция № 4 – располагается в пределах городской застройки. В 30 м от станции над рекой построен пешеходный мост. Поблизости находятся предприятия общепита и различные магазины. Ширина русла в месте отбора проб 3,6 м. Глубина в месте отбора проб 23 см. Дно состоит из камней и глины.

Станция № 5 – также располагается в пределах городской застройки ниже по течению от станции № 4 в непосредственной близости от различных зданий. Ширина русла в месте отбора проб 9 м. Глубина в месте отбора проб 16 см. Дно состоит из камней и валунов, засорено пакетами, дорожными знаками и прочим бытовым мусором.

По гидрологическим и морфологическим параметрам изученный участок можно охарактеризовать как *предгорно-равнинный*.

На месте отбора проб определяли освещенность и температуру (метеостанция Mastech MS6300), скорость течения (гидрометрическая микровертушка ГМЦМ – 1), температуру и pH воды (pH-метр Hanna,

модель HI 83141), отбирали воду в кислородные склянки для анализа кислорода (методом Винклера). Величину первичной продукции (ПП) определяли отдельно для фитопланктона (в склянки добавляли речную воду) и перифитона (в склянки добавляли навеску перифитона, собранного с точной площади) (застой склянок 24 ч) [15, 16].

Определение содержания растворенного кислорода проводили методом Винклера согласно РД 52.24.419. Биохимическое потребление кислорода определяли за 5 суток согласно РД 52.24.420. Определение содержания взвешенных веществ (ВВ) проводили в соответствии с РД 52.24.468 путем фильтрации воды через мембранные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм. Общее количество азота нитратного определяли в нефилтрованных пробах согласно ПНДФ 14.1:2:4.4 спектрофотометрическим методом на УФ-спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu).

Количество общего органического углерода рассчитывали по значению БПК<sub>5</sub> по уравнению регрессии, полученному Ли с соавт.: БПК<sub>5</sub> = 0,799ТОС-0,443 [10]. Величину валовой и чистой первичной продукции, а также траты на дыхание рассчитывали отдельно для планктонного сообщества и перифитона [12, 13]. При расчете валовой и чистой продукции исходили из длины светового дня (Т = 13 ч для марта – апреля), при расчете деструкции – Т = 24 ч.

Для оценки потоков CO<sub>2</sub> реки использовали формулу из работы Батмана и Рэймонда [4]:

$$fCO_2 = \sum_{IP} \left[ ([CO_2]_{\text{вода}} - [CO_2]_{\text{воздух}}) \times kCO_2 \times Sэ \right],$$

где  $fCO_2$  – поток CO<sub>2</sub> в зависимости от порядка водотока (IP);

$[CO_2]_{\text{вода}}$  и  $[CO_2]_{\text{воздух}}$  – молярная концентрация CO<sub>2</sub>, растворенного в воде и в воде в равновесии с атмосферой;

$kCO_2$  – скорость переноса CO<sub>2</sub> в потоке (м/сут);

$Sэ$  – площадь водотока, с которого рассчитывают эмиссию CO<sub>2</sub>.

### Результаты исследования и их обсуждение

Условия среды в период отбора колебались в широком диапазоне: температура воздуха изменялась в диапазоне от -10,3 до 10 °С, освещенность – 22502–168054 lux.

Температура воды изменялась в диапазоне 1,4–5,1 °С (среднее значение составило 2,6±1,5 °С). Электропроводность воды

находилась в диапазоне 88–210 мкСм/см (в среднем 152±40 мкСм/см). Величина возрастала по мере продвижения от парка к городу (табл. 1). Надо отметить, что в период весеннего таяния снега в реки попадает большой объем талых вод, минерализация которых стремится к нулю, поэтому электропроводность речных вод весной невысока [13].

Таблица 1

Гидролого-гидрохимические показатели р. Рогатка в весенний период 2021 г.

Показатель	№ станции				
	1	2	3	4	5
Температура воды, °С	1,5	1,5	1,4	3,4	5,1
Скорость течения, м/с	0,4	0,4	0,3	0,3	1,2
Электропроводность, мкСм/см	88	141	150	170	210
Водородный показатель рН, ед.	6,43	6,84	7,07	6,73	6,86
Кислород, мг/дм <sup>3</sup>	14,57	13,47	13,26	13,2	12,19
Кислород, % нас.	104	96	94	99	96
БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	2,26	2,21	1,8	2,1	3,15
ТОС*, мг/дм <sup>3</sup>	3,38	3,32	2,81	3,18	4,50
Азот нитратный**, мг/дм <sup>3</sup>	0,34	0,35	0,62	0,80	1,27
Взвешенные вещества, мг/дм <sup>3</sup>	2,7	4,7	4	5,6	6,4

Примечание: \* – расчетные данные; \*\* – нефильтрованные пробы.

Величина рН характеризует воды р. Рогатка как слабокислые (6,43–7,07 ед., в среднем 6,78±0,21 ед.), рН воды рек о. Сахалин в период весеннего половодья снижается до кислой реакции [13], поэтому полученные значения отражают естественную сезонную динамику гидрохимического состава р. Рогатка.

Значение растворенного кислорода было высоким на всех станциях и составило 12,19–14,57 мг/дм<sup>3</sup> (в среднем 13,34±0,76 мг/дм<sup>3</sup>). Насыщение воды кислородом изменялось в диапазоне 94–104 %.

Количество взвешенных веществ было невысоким и изменялось в диапазоне 2,7–6,4 мг/дм<sup>3</sup>, составляя в среднем 4,7±1,3 мг/дм<sup>3</sup>. Полученные значения характерны для участков рек и ручьев предгорного типа, которые даже в паводок имеют невысокую мутность. По сравнению с фоновым значением (19 мг/дм<sup>3</sup> [12]) содержание ВВ в наших исследованиях было в среднем более чем в 4 раза ниже.

Содержание нитратного азота было довольно значительным для рек Сахалина и находилось в пределах 0,34–1,27 мг/дм<sup>3</sup> (при среднем значении 0,68±0,34 мг/дм<sup>3</sup>), достигая максимума на ст. 5, расположенной в наиболее загрязненном районе. Эта величина значительно выше фоновой по данным СКИОВО за 2013 г. (0,205 N-NO<sub>3</sub> мг/дм<sup>3</sup>) [12]. По мере продвижения в сторону центра города река значительно обогащается нитратным азотом, который является индикатором наличия сточных вод.

Величина БПК<sub>5</sub> по станциям изменялась значительно (1,80–3,21, в среднем

2,30±0,45 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>), достигая максимума на ст. 5, расположенной в наиболее загрязненном месте отбора. Полученные величины в среднем в 1,5 раза выше, чем фоновое значение. За фоновую величину для этого водотока принимают БПК<sub>5</sub> = 1,5 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> [12]. Часть станций отбора расположена непосредственно в городе, поэтому можно предположить, что повышенное содержание легкоокисляемых органических веществ, приводящее к увеличению величины БПК<sub>5</sub> на этих станциях, является следствием в первую очередь попадания неочищенных или плохо очищенных сточных вод многочисленных зданий, расположенных как непосредственно на берегу реки, так и поблизости. Повышенные значения БПК<sub>5</sub> р. Рогатка, отобранных в районе парка, можно объяснить несколькими источниками, в том числе наличием близко-расположенных дорог, гостиниц, заведений питания, таянием загрязненного снега.

Содержание общего органического углерода, рассчитанное через величину БПК<sub>5</sub> по уравнению регрессии Ли с соавт. [10] составило 2,81–4,50 мг/дм<sup>3</sup> (в среднем 3,44±0,57 мг/дм<sup>3</sup>).

Численность фитопланктона была крайне низкой и изменялась в диапазоне 2240–4866 кл./л, составляя в среднем 3237±964 кл./л. Что касается продукции, то валовая первичная продукция фитопланктона находилась в диапазоне от 0,018 до 0,102 мгС/дм<sup>3</sup> в сутки (в среднем 0,027 мгС/дм<sup>3</sup> в сутки). Чистая продукция была положительной только на ст. 2 (0,045 мгС/дм<sup>3</sup> в сутки), на остальных станциях чистая продукция была отрицательной.

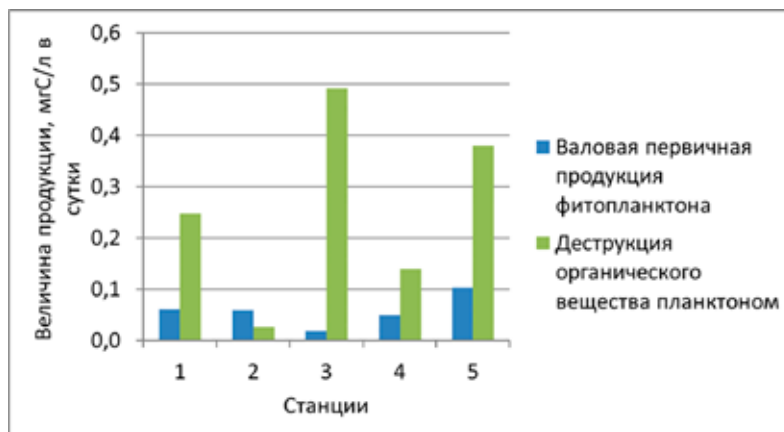


Рис. 2. Величины валовой первичной продукции фитопланктона и деструкции органического вещества планктонным сообществом в р. Рогатка весной 2021 г.

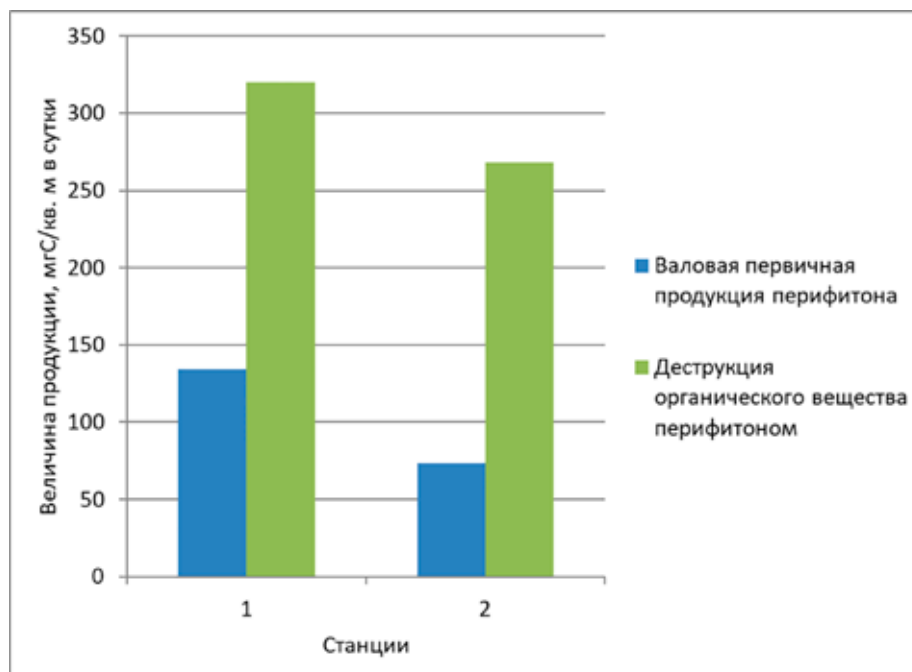


Рис. 3. Величины валовой первичной продукции и деструкции органического вещества перифитонном в р. Рогатка весной 2021 г.

Скорость деструкции органического вещества составляла 0,026–0,491 мгС/дм<sup>3</sup> в сутки (в среднем 0,166 мгС/дм<sup>3</sup> в сутки), что в 3–27 раз было выше скорости продуцирования (рис. 2). Такая картина (низкая чистая продукция и высокие траты на дыхание) свидетельствует о преобладании процессов разложения органического вещества над его продукцией, а также может быть связана с преобладанием в толще воды гетеротрофных организмов, потребляющих аллохтонное органическое вещество. Сообщество организмов, обитающих в тол-

ще воды текучих водотоков предгорного типа, малочисленно или вовсе отсутствует из-за невозможности противостоять течению. Среди планктона значительную часть занимают гетеротрофы (бактерии, простейшие и др.) [1]. Часто обнаруженные организмы привнесены извне (аллохтонное происхождение), т.е. смываются в водоток с почвы, лесной подстилки. Максимальный сток микроорганизмов в водоток происходит в период паводков и дождей.

Интегральная величина валовой первичной продукции планктона под квадрат-

ный метр была крайне низкой и изменялась в диапазоне 0,002–0,016 мгС/м<sup>2</sup> в сутки (в среднем 0,010 мгС/м<sup>2</sup> в сутки). Величина чистой продукции была выше нуля только на ст. 2 (0,0004 мгС/м<sup>2</sup> в сутки). Полученные величины вполне согласуются с представлениями о низкой продуктивности биоценозов вод малых водотоков горного и предгорного типа Дальнего Востока.

Продукцию перифитона удалось измерить только на двух станциях (ст. 1 и 2), так как на остальных станциях обрастания отсутствовали или были крайне малочисленны. Валовая продукция составила 73,5–134,5 мгС/м<sup>2</sup> в сутки (в среднем 104 мгС/м<sup>2</sup> в сутки) (рис. 3). Чистая продукция была отрицательной на обеих станциях. Величина деструкции составила 268–320 мгС/м<sup>2</sup> в сутки (в среднем 294 мг С/м<sup>2</sup> в сутки), что в 2–3 раза выше его продукции.

Полученные величины находятся в пределах, характерных для горных и предгорных участков водотоков Дальнего Востока. Так, в р. Кедровая (Приморье) величина продукции перифитона изменялась в пределах 100–8800 мгО<sub>2</sub>/м<sup>2</sup> в сутки (38–3300 мгС/м<sup>2</sup> в сутки) [16].

В перифитоне р. Рогатка преобладают гетеротрофные организмы, так же как и в планктоне.

Сравнивая интегральную величину валовой первичной продукции и деструкции органического вещества (ОВ) перифитона и фитопланктона р. Рогатка, необходимо отметить, что почти 100% вносит перифитон, поэтому оценку величины годовой продукции и деструкции ОВ провели по данным перифитона.

Для оценки трофического статуса и возможности самоочищения водотоков от избытка органического вещества применяют индекс биотического баланса (A/R), который представляет соотношение между новообразованием и разрушением органических веществ, т.е. разность между валовой первичной продукцией всех автотрофов и суммарной деструкцией, связанной с процессами метаболизма всех живых компонентов экосистемы водоема и обозначается как A/R (первоначально разработан для стоячих водоемов, затем широко распространенных и на текущие водотоки) [16, 17]. Если A/R < 1, то это отрицательный биотический баланс и такой водоем *олиготрофный*, так как деструкторы преобладают над продуцентами. Если A/R = 1, то это нулевой баланс, он характерен для *мезотрофных* водотоков, если A/R > 1, это положительный

биотический баланс, когда на фоне преобладания процессов продукции в экосистеме накапливается органическое вещество и экосистема подвержена *эвтрофированию* [16, 17].

Для р. Рогатка, как и для большинства рек горного и предгорного типа Дальнего Востока, наблюдали отрицательный биотический баланс и в планктонном, и в бентосном сообществах. A/R для планктонного сообщества был меньше 1 (0,04–0,35) за исключением ст. 2, где A/R составил 2,24. A/R для перифитонного сообщества составил 0,27–0,42. Сравнение показывает, что полученные оценки близки к таковым для других водотоков подобного типа. Например, в р. Кедровая (Приморье) A/R перифитона составил 0,12–1,37, в среднем 0,41 [16].

Оценить трофность р. Рогатка можно и по другим показателям (например, величина БПК<sub>5</sub>, содержание органического вещества и т.д.), однако наличие нескольких разных шкал и подходов (расчеты проводили в основном для стоячих водоемов или крупных рек) дает подчас разные результаты. Так, по величине БПК<sub>5</sub> р. Рогатка – это олиготрофный [18] или эвтрофный [19]. Наши расчеты показали, что также мало подходит для оценки трофности р. Рогатка индекс трофического состояния (ИТС), разработанный для стоячих водоемов, а также морских акваторий, так как нет прямой зависимости величины рН от содержания кислорода в быстротекущем водотоке.

В целом для малых текущих нерестовых водотоков о. Сахалин горного и предгорного типа, учитывая аллохтонность органического вещества и его высокую сезонную изменчивость в связи с жизненным циклом лососей, высокую растворимость кислорода при быстром течении и низкой температуре, а также низкую величину рН, в большей степени зависящую от пород водосборного бассейна, а не интенсивности фотосинтеза, выхода грунтовых вод непосредственно в русло, малые глубины и т.д., необходимо разработать региональную классификацию трофности.

При ориентировочной оценке годовой продукции принимали возможность круглогодичной вегетации автотрофного комплекса, учитывая развитие холодолюбивого комплекса автотрофов [20, 21], отсутствии полного ледостава с поправкой на период снежного покрова, который препятствует проникновению света в водоток, исключая площадь нерестилищ с выходом грунтовых вод. Период со снежным покровом продолжается 140 дней.

Таблица 2

Исходные данные для расчета потоков CO<sub>2</sub> на границе раздела атмосфера – поверхность р. Рогатка

Параметр	Значение
Порядок водотока	2
Средняя высота водосбора, м	390
Длина реки, км	10
Среднегодовое количество осадков, мм	822
Растворимость CO <sub>2</sub> в воде при t 1–10 °С, г/кг	2,5–3,2 (в среднем 2,9)
Суммарный годовой сток, км <sup>3</sup>	0,0164
Среднее содержание аллохтонного Сорг. в воде, мг/дм <sup>3</sup>	3,44
Площадь поверхности водотока, м <sup>2</sup>	50 000
Площадь водотока для расчёта эмиссии по уравнению Батмена и Реймонда**, м <sup>2</sup>	29065
Содержание свободной углекислоты (CO <sub>2</sub> своб.) в воде в половодье, мг/дм <sup>3</sup> *	1,7–12,8 (в среднем 7,3)
Содержание избыточно свободной углекислоты (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ) в воде в половодье, мг/дм <sup>3</sup> *	1,6–12,3 (в среднем 7,0)
Среднегодовой расход воды, м <sup>3</sup> /с*	0,52
Скорость эмиссии CO <sub>2</sub> из реки по уравнению Батмена и Реймонда**, гС/м <sup>2</sup> год	14,588
Среднее парциальное давление CO <sub>2</sub> для водотока 2 порядка умеренной зоны, $\mu\text{atm}$ **	3,5
Средняя скорость переноса CO <sub>2</sub> в воде (k) для водотока 2 порядка умеренной зоны, м/сутки	5

Примечание: \*[10]; \*\*[4].

В среднем годовая величина первичной продукции в р. Рогатка в районе работ для предгорно-равнинного участка составит 23,4 гС/м<sup>2</sup>, деструкции органического вещества – 66,2 гС/м<sup>2</sup>. Учитывая площадь водного зеркала, можно говорить ориентировочно о создании 1,2 тС и деструкции смываемого с водосбора, поступающего из атмосферы и образующегося в реке органического вещества, ежегодно 3,3 тС в р. Рогатка.

Таким образом, скорость и объемы новообразования органического вещества в р. Рогатка очень незначительны, несмотря на высокое содержание биогенных элементов (N-NO<sub>3</sub>). Органическое вещество в толще воды имеет по большей части аллохтонный генезис, т.е. привносится с терригенным стоком. В то же время величина деструкции ОВ превышает количество новообразованного ОВ, поэтому не весь, выделенный в процессе окисления CO<sub>2</sub> идет на фотосинтез. Эта не востребованная автотрофами часть растворенных в воде газов приводит к перенасыщению водотоков углекислым газом и метаном (в зависимости от достатка кислорода), что приводит

к сбросу парниковых газов из рек и ручьев в атмосферу. Также большую роль в насыщении малых текучих водотоков парниковыми газами и их поглощение из атмосферы играет привнос с грунтовыми водами газов от почвенного и корневого дыхания растений, растворения горных пород [5], количество осадков, площадь и возраст лесов в водосборе, площадь и порядок водотока и еще множество факторов [4]. Углекислый газ хорошо растворим в воде, и это позволяет водотокам активно фиксировать CO<sub>2</sub> даже без фотосинтеза [22]. Кроме того, высокие скорости течения ускоряют газообмен на разделе вода – атмосфера, тем самым ускоряя как поглощение, так и сброс CO<sub>2</sub> из быстротекущих водотоков [23].

Скорость деструкции ОВ и, соответственно, насыщения речных вод углекислым газом и эмиссии CO<sub>2</sub> из рек в атмосферу наряду со стоком CO<sub>2</sub> из рек в атмосферу от других источников также зависит от многих факторов – особенности водосбора (тип почв, растительности, антропогенной освоенности), климата, гидролого-гидрохимических характеристик водотока, формиру-



ющих местные гетеротрофные сообщества. Так, ручьи и реки США выбрасывают ежегодно  $97 \pm 32$  ТгС, в среднем с  $1 \text{ м}^2$  водной поверхности в год –  $2370 \pm 800$  г С/м<sup>2</sup> в год [4]. Была выведена линейная зависимость скорости эмиссии CO<sub>2</sub> (гС/м<sup>2</sup> год) из рек США (x) от годовой нормы осадков разных климатических зон (y):  $y = 23,1x - 4,4$  [4]. Процент площади поверхности водотока (y), с которой возможна эмиссия CO<sub>2</sub> рассчитывается также через количество осадков (x) по работе Батмена и Рэймонда:  $y = 0,723x - 0,013$  [4].

Гидрологические особенности р. Рогатка (высокая скорость течения, низкие температуры воды) приводят к тому, что насыщение воды кислородом достаточно для аэробного пути разложения поступающего органического вещества на большей части акватории реки, поэтому в атмосферу при деструкции ОВ может выбрасываться именно CO<sub>2</sub>.

Теперь оценим количество органического вещества, переносимого р. Рогатка за счет растворения CO<sub>2</sub>. Исходные данные для расчетов представлены в табл. 2.

Зафиксированный рекой из атмосферы CO<sub>2</sub> переносится из р. Рогатка в р. Красносельская порядка 44 тыс. тCO<sub>2</sub>/год или 12 тыс. тС/год.

Сток CO<sub>2</sub> с  $1 \text{ м}^2$  поверхности р. Рогатка за счет дегазации составляет ориентировочно  $14,59 \text{ гС/м}^2 \text{ год}$  или  $53,5 \text{ гCO}_2/\text{м}^2 \text{ год}$  (без учета гидробиологических процессов разложения и создания органического вещества), что, учитывая площадь водного зеркала для расчета эмиссии, составит порядка 0,4 тС в год, что в пересчете на CO<sub>2</sub> около 1,6 тCO<sub>2</sub>/год.

### Заключение

Содержание общего органического углерода, рассчитанное через величину БПК<sub>5</sub>, составило 2,81–4,50 мг/дм<sup>3</sup> (в среднем  $3,44 \pm 0,57$  мг/дм<sup>3</sup>).

Величина валовой первичной продукции фитопланктона, измеренная инструментально, находилась в диапазоне от 0,018 до 0,102 мгС/дм<sup>3</sup> в сутки (в среднем 0,027 мгС/дм<sup>3</sup> в сутки). Содержание общего органического углерода, рассчитанное через величину БПК<sub>5</sub>, составило 2,81–4,50 мг/дм<sup>3</sup> (в среднем  $3,44 \pm 0,57$  мг/дм<sup>3</sup>). Скорость деструкции органического вещества составляла 0,026–0,491 мгС/дм<sup>3</sup> в сутки (в среднем 0,166 мгС/дм<sup>3</sup> в сутки), что в 3–27 раз было выше скорости продуцирования. Преобладание процессов разложения органического вещества над его продукцией свидетель-

ствует о значительном количестве в толще воды гетеротрофных организмов, потребляющих аллохтонное органическое вещество.

Величина валовой продукции перифитона составила 73,5–134,5 мгС/м<sup>2</sup> в сутки (в среднем 104 мгС/м<sup>2</sup> в сутки). Величина деструкции составила 268–320 мгС/м<sup>2</sup> в сутки (в среднем 294 мгС/м<sup>2</sup> в сутки), что в 2–3 раза выше его продукции. В перифитоне р. Рогатка преобладают гетеротрофные организмы, так же как и в планктоне.

Таким образом, в р. Рогатка величина деструкции органического вещества почти в 3 раза выше, чем продукции. Органическое вещество имеет преимущественно аллохтонное происхождение. Подавляющую роль как в создании, так и в деструкции ОВ в реке имеет перифитон.

Для р. Рогатка, как и для большинства рек горного и предгорного типа Дальнего Востока, наблюдали отрицательный биотический баланс и в планктонном, и в бентосном сообществах. А/R для планктонного сообщества был меньше 1 (0,04–0,35) А/R для перифитонного сообщества составил 0,27–0,42.

Ежегодно величина валовой первичной продукции автотрофов в р. Рогатка может ориентировочно достигать 1,2 т С, количество органического вещества, потребляемого планктонным и перифитонным сообществом – 3,3 т С.

Расчеты показали, что поглощение из атмосферы CO<sub>2</sub> р. Рогатка составляет порядка 44 тыс. тCO<sub>2</sub>/год или 12 тыс. тС/год.

Сток CO<sub>2</sub> с  $\text{м}^2$  поверхности р. Рогатка за счет дегазации составляет ориентировочно  $14,59 \text{ гС/м}^2 \text{ год}$  или  $53,5 \text{ гCO}_2/\text{м}^2 \text{ год}$  (без учета гидробиологических процессов разложения и создания органического вещества), что, учитывая площадь водного зеркала для расчета эмиссии, составит порядка 0,4 тС в год, что в пересчете на CO<sub>2</sub> около 1,6 тCO<sub>2</sub>/год. Эмиссия CO<sub>2</sub> с  $\text{м}^2$  поверхности р. Рогатка за счет физико-химических процессов составляет ориентировочно  $14,59 \text{ гС/м}^2 \text{ год}$  или  $53,5 \text{ гCO}_2/\text{м}^2 \text{ год}$  (без учета гидробиологических процессов разложения и создания органического вещества), что, учитывая площадь водного зеркала для расчета эмиссии, составит порядка 0,4 тС в год, что в пересчете на CO<sub>2</sub> около 1,6 тCO<sub>2</sub>/год.

Полученные предварительные оценки поглощения и эмиссии углекислого газа, продукции и деструкции органического вещества малого водотока о. Сахалин позволят провести дальнейшие расчеты поглощения и эмиссии CO<sub>2</sub> поверхностными водами острова.

Список литературы

1. Беляева П.Г. Роль фитоперифитона в продукции органического вещества и круговороте азота в речных экосистемах (обзор) // Гидробиологический журнал. 2013. № 3. С. 13–26.
2. Копылов А.И., Косолапов Д.Б., Романенко А.В., Мылникова З.М., Косолапова Н.Г., Минеева Н.М., Крылов А.В. Микробная «петля» как компонент планктонных сообществ малых рек // Экосистемы малых рек: биоразнообразие, биология, охрана: тезисы докладов Всероссийской конференции (Борок, 16–19 ноября 2004 г.). Борок, 2004. С. 40.
3. Метелева Н.Ю. Структура и продуктивность фитоперифитона водоемов бассейна Верхней Волги: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Борок: ЯГТУ, 2013. 23 с.
4. Butman D., Raymond P. Significant efflux of carbon dioxide from streams and rivers in the United States. *Nature Geosci.* 2011. № 4. P. 839–842. DOI: 10.1038/ngeo1294.
5. Ward N.D., Bianchi T.S., Medeiros P.M., Seidel M., Richey J.E., Keil R.G., Sawakuchi H.O. Where Carbon Goes When Water Flows: Carbon Cycling across the Aquatic Continuum // *Front. Mar. Sci.*, 31 January 2017. *Sec. Marine Biogeochemistry*. DOI: 10.3389/fmars.2017.00007.
6. Пузанов А.В., Безматерных Д.М., Ермолаева Н.И., Котовщиков А.В. Оценка роли экосистем рек и озер Сибири в цикле углерода // Материалы региональной научно-практической конференции «Географы Алтая для устойчивого развития Алтайского региона» (Барнаул, 17–18 ноября 2022 г.). Вып. 30. 2022. С. 116–122.
7. Liu S. Carbon Dioxide Emission from Streams and Rivers as an Integrative Part of Terrestrial Respiration. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*. 2019. DOI: 10.19080/IJESNR.2019.19.556010.
8. Moran M.A., Kujawinski E.B., Stubbins A., Fatland R., Aluwihare L.I., Buchan A., et al. (2016). Deciphering ocean carbon in a changing world. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2016. № 113. P. 3143–3151. DOI: 10.1073/pnas.1514645113.
9. Hilmi N., Chami R., Sutherland M.D., Hall-Spencer J.M., Lebleu L., Benitez M.B. and Levin L. A. The Role of Blue Carbon in Climate Change Mitigation and Carbon Stock Conservation. *Front. Clim.* 2021. № 3. P. 710546. DOI: 10.3389/fclim.2021.710546.
10. Liu S., Kuhn C., Amatulli G., Aho K., Butman D.E., Allen G.H., Lin P., Pan M., Yamazaki D., Brinkerhoff C., Gleason C., Xia X., Raymond P. A. The importance of hydrology in routing terrestrial carbon to the atmosphere via global streams and rivers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2022. № 119 (11). DOI: 10.1073/pnas.2106322119.
11. Gómez-Gener L., Rocher-Ros G., Battin T. et al. Global carbon dioxide efflux from rivers enhanced by high nocturnal emissions. *Nat. Geosci.* 2021. № 14. P. 289–294. DOI: 10.1038/s41561-021-00722-3.
12. СКИОВО: схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейнов рек острова Сахалин. Книга 7. Сводный том СКИОВО бассейнов рек острова Сахалин. Утв. Приказом Амурского БВУ от 30.12.2014 № 05-07/125. 239 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.google.com/viewer?url=https%3A%2F%2Famurbvu.ru%2Findex.php%3Fdo%3Ddownload%26id%3D1056%26viewonline%3D1> (дата обращения: 18.11.2022).
13. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 18. Дальний Восток. Вып. 4. Сахалин и Курилы / Под ред. канд. геогр. наук М. Г. Васильковского. Л.: Гидрометеиздат, 1973.
14. Чудаева В.А. Особенности речного стока о. Сахалин. Ч. 2: Распределение группы металлов в растворенной и твердой фазах речных вод. Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. Деп. рук. ВИНТИ № 3376-B88, 34 с.
15. Богатов В.В., Федоровский А.С. Основы речной гидрологии и гидробиологии. Владивосток: Дальнаука, 2017. 384 с.
16. Медведева Л.А., Сиротский С.Е. Продукционные характеристики водорослей перифитона р. Кедровая (Приморье) // Биогеохимические и гидроэкологические исследования на Дальнем Востоке. 1998. Вып. 7. С. 63–76.
17. Богатов В.В. О закономерностях функционирования речных экосистем в свете базовых научных концепций // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2013. № 4. С. 63–76.
18. Неверова-Дзюпак Е., Цветкова Л.И. Оценка трофического состояния поверхностных вод: монография. СПб.: СПбГАСУ, 2020. 176 с.
19. ГОСТ 17.1.2.04-77 Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов. Охрана природы. Гидросфера: сб. ГОСТов. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000.
20. Медведева Л.А., Никулина Т.В. Каталог пресноводных водорослей юга Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2014. 271 с.
21. Никулина Т.В. Альгофлора бассейна реки Раздольной (Приморский край): автореф. дис. ... канд. биол. наук. Владивосток: БПИ ДВО РАН, 2006. 22 с.
22. Савенко В.С., Самсонов А.Л. Новый механизм поглощения углерода. Отыскание missing sink // Моделирование коэволюции природы и общества: проблемы и опыт. К 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Моисеева: тр. Всероссийской научной конференции (Москва, 07–10 ноября 2017 г.). М.: Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, 2017. С. 370–381.
23. Horgby Å., Segatto P.-L., Bertuzzo E., Lauerwald R., Lehner B., Ulseth A.J., Vennemann T.W., Battin T.J. Unexpected large evasion fluxes of carbon dioxide from turbulent streams draining the world's mountains. *Nature Communications*, 2019. DOI: 10.1038/s41467-019-12905-z.