

УДК 543.37 + 556.531

## О ДИНАМИКЕ РАСТВОРЕННОГО УГЛЕРОДА В ГЛАВНОМ РУСЛЕ РЕКИ ЛЕНЫ В ИЮЛЕ 2017 Г.

© 2021 г. И. И. Пипко<sup>1,\*</sup>, С. П. Пугач<sup>1</sup>, Ю. А. Моисеева<sup>1,2</sup>, О. В. Дударев<sup>1</sup>, И. А. Репина<sup>3,4</sup>, академик РАН В. И. Сергиенко<sup>5</sup>, член-корреспондент РАН И. П. Семилетов<sup>1</sup>

Поступило 27.05.2021 г.

После доработки 06.07.2021 г.

Принято к публикации 07.07.2021 г.

В июле 2017 г. исследована динамика форм растворенного углерода в водах главного русла р. Лены от среднего течения (г. Якутск) до придельтовой зоны моря Лаптевых. Показано, что в летний период речные воды являлись поставщиком  $\text{CO}_2$  в атмосферу и на арктический шельф; интенсивность поступления  $\text{CO}_2$  в атмосферу изменялась от 0.8 до 137.9 ммоль  $\text{м}^{-2}$  сутки<sup>-1</sup> при среднем значении 31.3 ммоль  $\text{м}^{-2}$  сутки<sup>-1</sup>. Наибольшая пространственная изменчивость гидрохимических и гидрооптических характеристик наблюдалась в области среднего течения реки, что определялось вариациями расхода воды, а также влиянием притоков. Обнаруженные различия средних величин изучаемых параметров, рассчитанных на двух участках реки, сформировались на фоне высокого паводка в среднем течении и межennaleго характера стока — в нижнем. Анализ качественного состава растворенного органического вещества (РОВ), выполненный на основе его оптических характеристик, показал присутствие более лабильного РОВ в среднем течении реки по сравнению с нижним. Установлена связь оптических характеристик и состава РОВ с концентрациями растворенного  $\text{CO}_2$  в главном русле р. Лены. Показано, что оптические параметры вод являются полезным инструментом для понимания динамики и качества речного РОВ, а также его взаимосвязи с потоками  $\text{CO}_2$  в арктических реках.

**Ключевые слова:** арктические реки, растворенный углерод, карбонатная система, потоки  $\text{CO}_2$ , мерзлота, климат

**DOI:** 10.31857/S2686739721100133

Реки являются важнейшим путем мобилизации и транспортировки растворенного углерода в океан, во многом определяя особенности углеродного цикла на арктическом шельфе и в Северном Ледовитом океане (СЛО) в целом. Высокие концентрации растворенного углерода в речных водах, а также интенсивный обмен углекислым газом ( $\text{CO}_2$ ) с атмосферой обуславливают значимость речных вод не только в углеродном цикле,

но и в климатических изменениях. В настоящее время это влияние возрастает — в последние десятилетия документировано значительное увеличение стока великих сибирских рек в СЛО [1, 2].

Река Лена — одна из крупнейших сибирских рек, уступающая по объему стока только Енисею и поставляющая в СЛО ~1/5 часть от общего речного стока. Длина этой водной магистрали составляет 4410 км, а площадь водосборного бассейна, подстилаемого многолетней преимущественно сплошной мерзлотой, составляет 2490 тыс. км<sup>2</sup> [3]. Температура в Арктике растет наиболее высокими темпами, влияя на функционирование всей арктической экосистемы; интенсификация таяния многолетнемерзлых пород и мобилизация законсервированного в них органического вещества рассматривается как одно из важнейших проявлений изменения климата [4]. Однако вопрос о современных особенностях трансформации растворенных форм неорганического и органического углерода в водах реки Лены и процессах, их определяющих, остается малоизученным. Этой проблеме посвящены лишь несколько работ [5–9], а основная часть исследо-

<sup>1</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

<sup>3</sup> Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>4</sup> Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>5</sup> Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

\*E-mail: irina@poi.dvo.ru

Таблица 1. Характеристики комплексных станций

Ст.	Дата	Широта	Долгота	Глубина места, м
1	21.07.2017	62.20	129.89	15.0
2	21.07.2017	62.66	129.88	10.5
3	22.07.2017	62.97	129.70	8.7
4*	22.07.2017	63.44	129.62	4.0
5	22.07.2017	63.50	128.81	28.0
6	22.07.2017	63.63	128.09	11.3
7	23.07.2017	63.92	127.44	12.7
8	23.07.2017	64.12	126.94	9.3
9**	23.07.2017	64.36	126.41	5.0
10	23.07.2017	64.64	125.51	10.2
11	24.07.2017	65.06	124.82	7.0
12	24.07.2017	65.36	124.40	7.5
13	24.07.2017	65.70	124.35	8.7
14	24.07.2017	66.12	123.99	12.2
16	25.07.2017	66.43	123.70	15.2
17	25.07.2017	66.91	123.43	9.1
18	25.07.2017	67.35	123.18	9.5
19	25.07.2017	67.74	123.13	13.0
20	25.07.2017	67.99	123.21	15.3
22	26.07.2017	68.27	123.76	11.0
23	26.07.2017	68.70	123.98	11.0
24	26.07.2017	69.18	124.33	10.8
25	26.07.2017	69.76	125.09	12.0
26	27.07.2017	70.09	125.85	9.0
27	27.07.2017	70.52	126.01	14.8
28	27.07.2017	70.61	127.19	21.0
30	28.07.2017	71.65	127.27	21.0
31	28.07.2017	72.01	127.02	22.0
32	28.07.2017	72.38	126.76	22.0
33	29.07.2017	72.35	127.69	20.0
34	29.07.2017	72.07	128.41	8.0
35	29.07.2017	71.96	129.38	9.0

Примечание. \* Алдан, \*\* Вилюй.

ваний динамики углерода проводилась только в нижнем течении и в дельте реки Лены ([3, 10] и приведенные в них ссылки). Кроме того, количественные оценки величин потоков  $\text{CO}_2$  в системе речная вода—атмосфера в главном русле реки Лены ниже впадения правобережного притока Алдана ранее не выполнялись.

Цель исследования — оценить пространственную изменчивость форм растворенного углерода в среднем и нижнем течении реки Лены и идентифицировать процессы, ее определяющие; на основе оптических характеристик выявить из-

менчивость состава и свойств растворенного органического вещества (РОВ) в русле реки; количественно оценить интенсивность поступления  $\text{CO}_2$  из среднего и нижнего участков русла реки Лены в атмосферу.

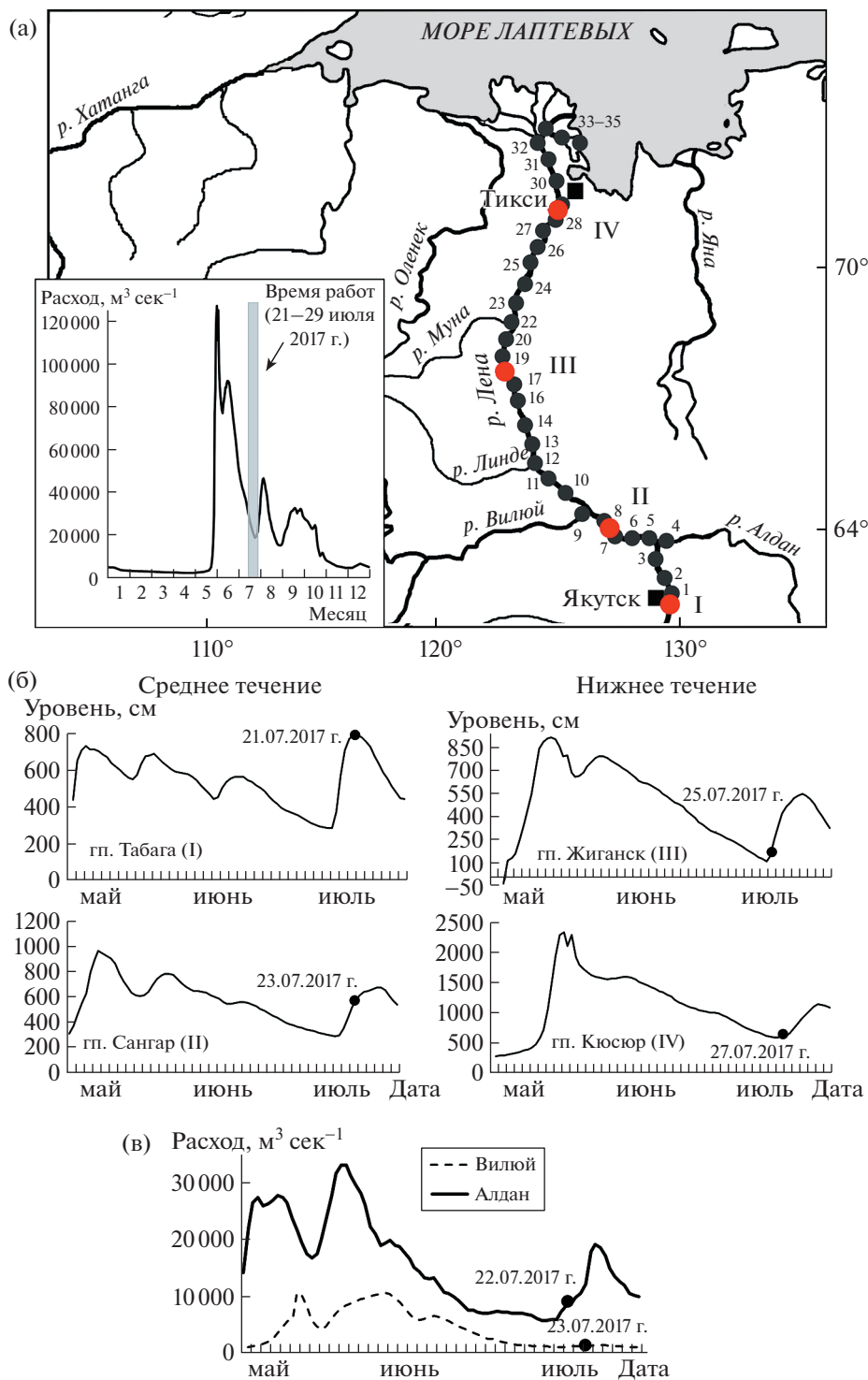
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Комплексные исследования вод главного русла р. Лены в среднем и нижнем течении (граница между ними определена местом впадения левобережного притока Вилюя [11]) были проведены в июле 2017 г. (рис. 1). Работы выполнялись с борта маломерного судна (средняя скорость 30 км час<sup>-1</sup>) в фарватере реки в диапазоне глубин 7–28 м (табл. 1); образцы воды отбирались с поверхностного и придонного горизонтов. Из 32 комплексных станций две (ст. 4 и 9) были выполнены в устьях притоков Алдана и Вилюя (в пяти и трех километрах от места впадения соответственно, рис. 1 а). Были проведены измерения pH, общей щелочности ( $A_T$ ), растворенного органического углерода (РОУ), спектров абсорбции окрашенной фракции РОВ. На основе измеренных спектров были рассчитаны другие оптические характеристики РОВ — коэффициент поглощения ( $a_{254}$ ), углы наклона спектра в интервалах длин волн 275–295 нм ( $S_{275-295}$ ) и 350–400 нм ( $S_{350-400}$ ), отношение углов наклона в этих интервалах длин волн ( $S_R$ ), а также степень ароматичности ( $C_{Ar}$ ). В речных водах также определялись температура, содержание взвешенного материала (ВМ) и растворенного кислорода. В приводном слое атмосферы регистрировались содержание  $\text{CO}_2$ , скорость и направление ветра, давление и влажность воздуха. На основе измеренных параметров карбонатной системы (pH и  $A_T$ ) рассчитывались концентрации растворенного  $\text{CO}_2$ , растворенного неорганического углерода ( $C_T$ ), величины парциального давления  $\text{CO}_2$  ( $p\text{CO}_2$ ) в речных водах, а также потоки  $\text{CO}_2$  ( $F_{\text{CO}_2}$ ) между водой и атмосферой. Методы измерения и расчетов подробно описаны в [6, 7, 12, 13].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИЯ

Распределение растворенных форм углерода в поверхностных водах главного русла реки в июле 2017 г. демонстрировало значительную пространственную динамику (рис. 2, 3).

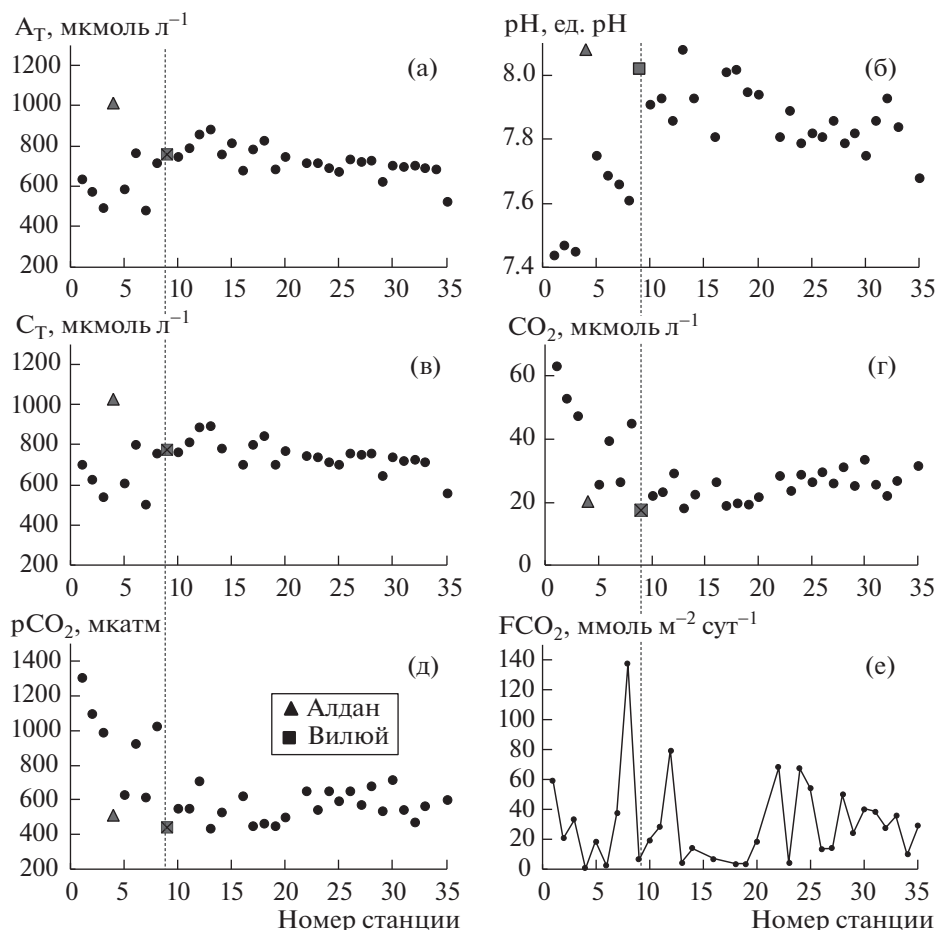
Наибольшие амплитуды величин были обнаружены в области среднего течения реки; в водах этого участка были определены экстремальные значения параметров карбонатной системы (pH,  $A_T$ ,  $C_T$ ,  $p\text{CO}_2$ ), а также оптических характеристик РОВ (рис. 2, 3). Разброс значений pH составлял около 1 ед. pH,  $A_T$  и  $C_T$  изменялись более, чем в два раза, а  $p\text{CO}_2$  — почти в три раза. При этом мак-



**Рис. 1.** Карта района исследований, положение комплексных станций и гидропостов (отмечены красным цветом), гидрограф реки в 2017 г. (гп Кюсюр, [2]) (а), уровень воды на различных гидропостах в главном русле р. Лены (https://allrivers.info/region/russia/dvfo-sever) (б), расход воды в притоках Алдан (гп Верхоянский перевоз) и Вилюй (гп Хатырык-Хомо) (https://gmvo.skniivh.ru/) (в) во время работ.

симальное содержание растворенного в речных водах  $\text{CO}_2$  более, чем втрое превышало атмосферные величины.

Работы на первых станциях (ст. 1–3) совпали с пиком летнего дождевого паводка, превосходящего по интенсивности весеннее половодье на

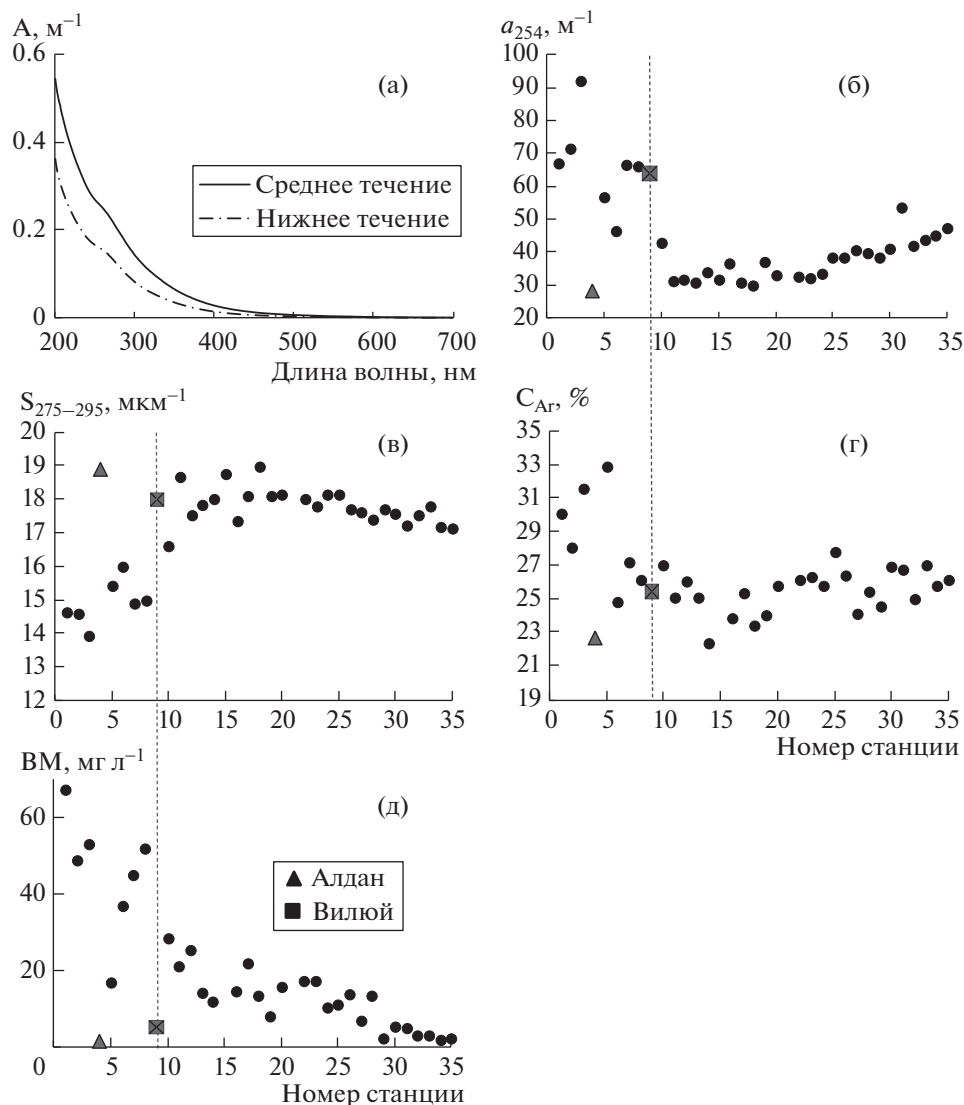


**Рис. 2.** Распределение общей щелочности, (а),  $pH_{in\ situ}$  (б), растворенного неорганического углерода (в), растворенного  $CO_2$  (г), парциального давления  $CO_2$  (д) в поверхностных водах р. Лены, потоков  $CO_2$  между водой и атмосферой (е). Граница между средним и нижним течениями показана пунктирной линией.

данном участке реки (рис. 1 б). Это обусловило наиболее значимое влияние почвенных вод, обогащенных органическим веществом и  $CO_2$ , на распределение гидрохимических параметров в русле. Уровень воды на этих станциях почти в два раза превышал среднюю за последние 14 лет величину (470 см) и был близок к абсолютному максимуму за указанный период наблюдений (816 см, гп Табага, <https://allrivers.info/region/russia/dvfo-sever>). Следует отметить, что мощные летние паводки и сравнительно слабо выраженное весеннее половодье характерны для водного режима этого участка р. Лены, формирующегося под влиянием правобережных притоков Витима и Олекмы [14]. Влияние паводковых вод выражалось как в наименьших величинах pH и  $A_T$ , так и в высоких значениях  $pCO_2$  и РОУ. Содержание РОУ на станциях 1–3 было наибольшим из измеренных в главном русле реки (9.3 мг л<sup>-1</sup> при диапазоне изменчивости 4.0–9.3 мг л<sup>-1</sup>); распределение оптических характеристик (максимальные значения

$a_{254}$ ,  $C_{Ar}$ , минимальные величины  $S_{275-295}$  и пониженные  $S_{350-400}$ ) указывало на присутствие высокомолекулярного ароматического РОУ, способного к фото- и биоразложению [3, 15] (рис. 3). Паводковая волна сопутствовала исследованиям в русле реки на протяжении всего среднего течения, но на ст. 5–8 ее уровень еще не достиг максимума (рис. 1 б).

Неоднородность исследуемых величин в среднем течении реки определялась и водами Алдана, крупнейшего притока р. Лены и шестого по объему стока среди всех российских рек. Река протекает в гористой местности, дренируя комплексы кристаллических и метаморфических пород, и лишь в низовьях – по межгорной равнине. Воды Алдана по химическому составу гидрокарбонатно-кальциевые, почвы водосбора – нейтральные и слабощелочные. Подземное питание может достигать 20–30% от общего стока [11]. Во время работ расход воды в Алдане был низким, соответствующим периоду летней межени (рис. 1 в). Специфика дренируемых пород и режим питания



**Рис. 3.** Осредненные оптические спектры РОВ в поверхностных водах среднего и нижнего течения реки (а), распределение коэффициента абсорбции (б), угла наклона спектра в интервале длин волн 275–295 нм (в), степени ароматичности РОВ (г) и взвешенного материала (д). Граница между средним и нижним течениями показана пунктирной линией.

определяли повышенные  $A_T$  и рН, относительно низкие величины рСО<sub>2</sub> и минимальное для разреза содержание ВМ в водах реки (рис. 3). К характерным особенностям вод р. Алдана в июле 2017 г. можно отнести низкое содержание РОУ (4.2 мг л<sup>-1</sup>), минимальные для района исследований величины  $a_{254}$  и  $C_{Ar}$ , а также максимальные значения  $S_{275-295}$ , что свидетельствует об ограниченном поступлении почвенного РОВ и/или о более высокой степени его фоторазложения. Это также могло быть одним из факторов, определяющих пониженные величины рСО<sub>2</sub> в устьевой области р. Алдана. Отметим, что измеренные здесь значения  $A_T$  оказались в 1.5 раза выше обнаруженных нами ранее величин [6, 7], в первую очередь, вследствие маловодности притока в исследуемый период.

В июле 2017 г. р. Вилюй также характеризовалась очень низкой водностью (рис. 1 в), что в данной гидрологической ситуации обусловило слабое влияние вод притока на распределение изучаемых параметров в главном русле р. Лены (рис. 2, 3).

В нижнем течении мы не наблюдали большой изменчивости исследуемых характеристик (рис. 2, 3). Это определялось как гидрографом реки — на данном участке мы исследовали не паводковые, а более “старые” воды, поступившие в реку в период летней межени, так и отсутствием крупных притоков (рис. 1). Отметим, что в экспедиции 2017 г. в нижнем течении реки не были обнаружены локальные участки с характеристиками, резко отличающимися от фоновых, аналогичные выявленным летом 2003 г. [6, 16].

**Таблица 2.** Средние величины гидрохимических и гидрооптических параметров в поверхностных водах главного русла р. Лены

Параметр, участок реки	$A_T$ , МКМОЛЬ·Л <sup>-1</sup>	pH, ед. pH	$C_T$ , МКМОЛЬ·Л <sup>-1</sup>	$CO_2$ , МКМОЛЬ·Л <sup>-1</sup>	$pCO_2$ , МКАТМ	POУ, МГ·Л <sup>-1</sup>	$a_{254}$ , М <sup>-1</sup>	$C_{Ar}$ , %	$S_{275-295}$ , МКМ <sup>-1</sup>	$S_{350-400}$ , МКМ <sup>-1</sup>	$S_R$
среднее течение, $n = 7$	$608.9 \pm 106.5$	$7.58 \pm 0.13$	$651 \pm 110$	$43 \pm 13$	$944 \pm 249$	$7.5 \pm 1.3$	$66.6 \pm 14.0$	$28.7 \pm 2.9$	$14.9 \pm 0.7$	$16.8 \pm 0.8$	$0.9 \pm 0.1$
нижнее течение, $n = 23$	$729.8 \pm 74.2$	$7.87 \pm 0.09$	$719 \pm 169$	$25 \pm 4$	$568 \pm 60$	$4.9 \pm 1.0$	$37.4 \pm 6.1$	$25.5 \pm 1.3$	$17.8 \pm 0.5$	$18.1 \pm 1.4$	$1.0 \pm 0.1$

Сопоставление средних величин изучаемых параметров, рассчитанных для двух участков реки, показало их существенное различие (табл. 2), что определялось, главным образом, изменением режима стока – высоким дождевым паводком в среднем течении и периодом летней межени в низовьях р. Лены (рис. 1). Так, концентрация растворенного  $CO_2$  в среднем течении была в 1.5 раза выше по сравнению с нижним; величины POУ, pH,  $a_{254}$  и  $S_{275-295}$  также статистически значительно отличались. Анализ оптических характеристик РОВ показал неидентичность его качественного состава на разных участках реки; осредненные оптические спектры РОВ имели специфические особенности (рис. 3 а). Высокая оптическая плотность вод в области коротких длин волн, пониженные величины  $S_{275-295}$  и  $S_{350-400}$  и повышенные  $C_{Ar}$  в водах среднего течения свидетельствовали о присутствии более лабильного РОВ, способного к фото- и биодеструкции, а также о более коротком времени пребывания этого органического вещества в речных водах [3, 15].

Поверхностные воды были пересыщены  $CO_2$  относительно его содержания в атмосфере (рис. 2). Устойчивые корреляционные связи оптических параметров с концентрациями растворенного  $CO_2$  в русле реки свидетельствовали о тесной взаимосвязи последних с составом РОВ (табл. 3). Содержание  $CO_2$  было значительно выше в водах среднего течения (табл. 2), что было обусловлено более высокими концентрациями  $CO_2$  и лабильного РОВ, вымываемых из почв. При этом, как было показано ранее, в нижнем течении РОВ бы-

**Таблица 3.** Коэффициенты корреляции оптических параметров РОВ с концентрациями растворенного  $CO_2$  в поверхностных водах главного русла р. Лены

Параметр	$a_{254}$ , М <sup>-1</sup>	$S_{275-295}$ , МКМ <sup>-1</sup>	$S_R$	$C_{Ar}$ , %
$r, n = 30$	0.75	-0.77	-0.37	0.52

ло в меньшей степени способным к био- и фото-разложению, что определялось как поступлением деградированного РОВ из более глубоких почвенных горизонтов в период летней межени, так и более длительным временем его пребывания в речных водах [3]. О более активных процессах деструкции органического вещества в водах среднего течения свидетельствовали и низкие концентрации растворенного кислорода, степень насыщения которым снижалась здесь до 84%, тогда как в дельте Лены вблизи устья Быковской протоки она возрастала до 98%.

Выполненные синхронно с гидрохимическими анализами метеорологические наблюдения позволили рассчитать потоки  $CO_2$  ( $F_{CO_2}$ ) в системе вода–атмосфера в главном русле реки Лены (рис. 2 е, табл. 4). Поток  $CO_2$  на протяжении исследованной части русла был направлен в атмосферу, средняя скорость эвазии составила  $31.3$  ммоль м<sup>-2</sup> сутки<sup>-1</sup>. Величины  $F_{CO_2}$  широко варьировали в соответствии с изменением  $pCO_2$  и коэффициента газопереноса, однако статистически значимой разницы в средних значениях не наблюдалось (табл. 4). Повышенные значения  $pCO_2$  в среднем русле в значительной степени компенсировались более высокими скоростями ветра на нижнем участке реки.

Полученные значения  $F_{CO_2}$  оказались сопоставимы с величинами потоков в системе вода–атмосфера в период летней межени в главном русле другой “мерзлотной” реки – Колымы [17] и более чем в три раза ниже потоков, рассчитанных для вод р. Оби в летний сезон 2016 г. ( $102.1$  ммоль м<sup>-2</sup> сутки<sup>-1</sup>, [12]). Такое различие в величинах  $F_{CO_2}$  определялось более высокой степенью пересыщения вод Оби  $CO_2$ , обусловленной, в первую очередь, состоянием многолетнемерзлых пород в бассейне реки. В отличие от восточно-сибирских рек, подстилаемых, главным образом, сплошной многолетней мерзлотой, здесь преобладает прерывистая, массивно-островная и островная мерз-

**Таблица 4.** Средние величины скорости ветра ( $U$ ), коэффициента газопереноса ( $k$ ) и потоков  $\text{CO}_2$  ( $F_{\text{CO}_2}$ ) в водах главного русла р. Лены

Параметр, участок реки	$U$ , м с <sup>-1</sup>	$k$ , см час <sup>-1</sup>	$F_{\text{CO}_2}$ , ммоль м <sup>-2</sup> сутки <sup>-1</sup>
среднее течение, $n = 7$	$5.0 \pm 2.5$	$7.75 \pm 7.08$	$39.8 \pm 47.8$
нижнее течение, $n = 23$	$7.1 \pm 2.2$	$15.05 \pm 8.43$	$28.8 \pm 22.7$

лота, в большей степени подверженная влиянию климатических изменений. При этом, как показано в [12, 18], наиболее значимые биогеохимические последствия деградации многолетнемерзлых пород, приводящие, в том числе, к увеличению содержания  $\text{CO}_2$  в наземных водах, наблюдаются в зоне распространения прерывистой мерзлоты. Значимым фактором формирования различий являлись и обширные торфяники в водосборе р. Оби, в частности, крупнейшее в мире Васюганское болото с огромными запасами лабильного органического вещества [19].

## ВЫВОДЫ

Исследована динамика форм растворенного углерода в главном русле р. Лены от среднего течения (г. Якутск) до придельтовой зоны моря Лаптевых в июле 2017 г.; определены оптические характеристики РОВ речных вод. Для среднего и нижнего течений реки были рассчитаны скорости обмена  $\text{CO}_2$  между водами главного русла р. Лены и атмосферой. Показано, что в летний период речные воды являлись поставщиком  $\text{CO}_2$  в атмосферу и на арктический шельф, что определялось как протекающими непосредственно в них процессами деструкции лабильной части органического вещества, так и высокими концентрациями вымываемого из почв  $\text{CO}_2$ . Интенсивность поступления  $\text{CO}_2$  в атмосферу изменялась от 0.8 до 137.9 ммоль м<sup>-2</sup> сутки<sup>-1</sup> при среднем значении 31.3 ммоль м<sup>-2</sup> сутки<sup>-1</sup>. В результате в июле 2017 г. с исследуемой части реки (1628 км русла при средней ширине 2 км) в атмосферу поступило порядка  $3.8 \times 10^4$  т С в форме  $\text{CO}_2$ , что лишь на порядок ниже среднемесячного выноса водами реки растворенного органического и неорганического углерода, рассчитанного для замыкающего створа ( $4.8 \times 10^5$  т С и  $7.8 \times 10^5$  т С соответственно).

Наибольшая пространственная изменчивость и экстремальные величины изучаемых параметров зарегистрированы в зоне среднего течения, где исследования совпали по времени с пиком дождевого паводка, превосходящим по расходу и уровню воды весеннее половодье. Влияние паводковых вод с высоким содержанием органиче-

ского вещества и  $\text{CO}_2$  модифицировалось в некоторой степени водами крупных притоков, фаза водного стока которых соответствовала периоду малой водности.

Значимые различия средних величин исследуемых параметров на двух участках реки определялись, в первую очередь, водным режимом – высоким дождевым паводком в среднем течении и периодом летней межени – в нижнем.

Анализ качественного состава РОВ, выполненный на основе его оптических характеристик, показал присутствие более лабильного РОВ в среднем течении реки по сравнению с нижним. Установлена связь оптических характеристик и состава РОВ с концентрациями растворенного  $\text{CO}_2$  в главном русле р. Лены. Показано, что оптические параметры являются полезным инструментом для понимания динамики и качества речного РОВ, а также его взаимосвязи с потоками  $\text{CO}_2$  в арктических реках.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Анализ динамики гидрохимических параметров речных вод выполнен за счет гранта РНФ № 21-17-00027, оптических характеристик – гранта РФФИ № 20-05-00545, обобщение биогеохимических данных и подготовка к публикации – за счет гранта РНФ № 21-77-30001. Экспедиционные исследования были организованы при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (тема № 121021500057-4).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shiklomanov A., Déry S., Tretiakov M., Yang D., Magritsky D., Georgiadi A., Tang W.* River Freshwater Flux to the Arctic Ocean. In: Yang D., Kane D.L. (eds) Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems. Springer, Cham. 2021. P. 703–738, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-50930-9\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50930-9_24)
2. *Shiklomanov A.I., Holmes R.M., McClelland J.W., Tank S.E., Spencer R.G.M.* Arctic Great Rivers Observatory. Discharge Dataset, 2021. Version 20210527. <https://www.arcticrivers.org/data>
3. *Walker S.A., Amon R.M.W., Stedmon C.A.* Variations in High-latitude Riverine Fluorescent Dissolved Organic Matter: A Comparison of Large Arctic Rivers // *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2013. V. 118. P. 1689–1702.
4. *Lim A.G., Loiko S.V., Kuzmina D.M., Krickov I.V., Shirokova L.S., Kulizhsky S.P., Vorobyev S.N., Pokrovsky O.S.* Dispersed Ground Ice of Permafrost Peatlands: Potential Unaccounted Carbon, Nutrient and Metal Sources // *Chemosphere.* 2021. V. 266. 128953.
5. *Кузьмин М.И., Тарасова Е.Н., Бычинский В.А., Карabanov Е.Б., Мамонтов А.А.* Составляющие гидрохимического режима вод р. Лены // *Водные ресурсы.* 2009. Т. 36. № 4. С. 440–451.
6. *Пипко И.И., Пугач С.П., Дударев О.В., Семилетов И.П., Чаркин А.Н.* Карбонатные параметры вод реки Лены: характеристики и распределение // *Геохимия.* 2010. Т. 48. №11. С. 1206–1213.

7. Semiletov I.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., Dudarev O.V., Pugach S.P., Charkin A.N., McRoy C.P., Kosmach D., Gustafsson Ö. Carbon Transport by the Lena River from its Headwaters to the Arctic Ocean, with Emphasis on Fluvial Input of Terrestrial Particulate Organic Carbon vs. Carbon Transport by Coastal Erosion // *Biogeosciences*. 2011. V. 8. P. 2407–2426.
8. Георгиади А.Г., Тананаев Н.И., Духова Л.А. Гидрохимический режим реки Лены в августе 2018 г. // *Океанология*. 2019. Т. 59. № 5. С. 881–884.
9. Vorobyev S.N., Karlsson J., Kolesnichenko Y.Y., Koretz M., Pokrovsky O.S.: Fluvial Carbon Dioxide Emission from the Lena River Basin during Spring Flood // *Biogeosciences Discuss.*, <https://doi.org/>, in review, 2021. <https://doi.org/10.5194/bg-2021-109>.
10. Juhls B., Overduin P.P., Hölemann J., Hieronymi M., Matsuoka A., Heim B., Fischer J. Dissolved Organic Matter at the Fluvial–marine Transition in the Laptev Sea Using in situ Data and Ocean Colour Remote Sensing // *Biogeosciences*. 2019. V. 16. P. 2693–2713.
11. Региональная оценка подземного питания рек СССР / Под ред. А.И. Чеботарева, О.В. Попова. Л.: Гидрометеиздат, 1968, вып. 154, 175 с.
12. Пипко И.И., Пугач С.П., Савичев О.Г., Репина И.А., Шахова Н.Е., Моисеева Ю.А., Барсков К.В., Сергиенко В.И., Семилетов И.П. Динамика растворенного неорганического углерода и потоков CO<sub>2</sub> между водой и атмосферой в главном русле реки Обь // *ДАН*. 2019. Т. 484. № 6. С. 691–697.
13. Pugach S.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., Shirshin E.A., Perminova I.V., Gustafsson Ö., Bondur V.G., Ruban A.S., Semiletov I.P. Dissolved Organic Matter and its Optical Characteristics in the Laptev and East Siberian Seas: Spatial Distribution and Interannual Variability (2003–2011) // *Ocean Sci*. 2018, V. 14. P. 87–103.
14. Соколов А.А. Гидрография СССР. Гидрометеиздат, Ленинград, 1952. 472 с.
15. Hansen A.M., Kraus T.E.C., Pellerin B.A., Fleck J.A., Downing B.D., Bergamaschi B.A. Optical Properties of Dissolved Organic Matter (DOM): Effects of Biological and Photolytic Degradation // *Limnol. Oceanogr*. 2016. V. 61. P. 1015–1032.
16. Дударев О.В., Семилетов И.П., Чаркин А.Н. Масштабы неоднородностей состава взвеси в системе река Лена – море Лаптевых // *ДАН*. 2006. Т. 411, № 4. С. 527–534.
17. Denfeld B., Frey K.E., Sobczak W.V., Mann P.J., Holmes R.M. Summer CO<sub>2</sub> Evasion from Streams and Rivers in the Kolyma River Basin, North-east Siberia // *Polar Research*. 2013. V. 32. 19704.
18. Loiko S.V., Pokrovsky O.S., Raudina T.V., Lim A.G., Kolesnichenko L.G., Shirokova L.S., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N. Abrupt Permafrost Collapse Enhances Organic Carbon, CO<sub>2</sub>, Nutrient and Metal Release into Surface Waters // *Chem. Geol*. 2017. V. 471. P. 153–165.
19. Perminova I.V., Shirshin E.A., Zhrebker A., Pipko I.I., Pugach S.P., Dudarev O.V., Nikolaev E.N., Grigoryev A.S., Shakhova N., Semiletov I.P. Signatures of Molecular Unification and Progressive Oxidation Unfold in Dissolved Organic Matter of the Ob-Irtysh River System along its Path to the Arctic Ocean // *Sci. Reports*. 2019. V. 9. 19487.

## ON DISSOLVED CARBON DYNAMICS IN THE MAIN STEM OF THE LENA RIVER IN JULY 2017

I. I. Pipko<sup>a, #</sup>, S. P. Pugach<sup>a</sup>, Yu. A. Moiseeva<sup>a, b</sup>, O. V. Dudarev<sup>a</sup>, I. A. Repina<sup>c, d</sup>,  
Academician of the RAS V. I. Sergienko<sup>e</sup>, and Corresponding Member of the RAS I. P. Semiletov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Ilichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

<sup>b</sup> *Tomsk National Research Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation*

<sup>c</sup> *Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>d</sup> *Research computing center, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

<sup>e</sup> *Institute of Chemistry, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

<sup>#</sup> *E-mail: irina@poi.dvo.ru*

The dynamics of dissolved carbon in the main stem of the Lena River from the middle reaches (Yakutsk) to the nearshore zone of the Laptev Sea was investigated during July 2017. It is shown that in the summer period river waters were a source of CO<sub>2</sub> to the atmosphere and the Arctic shelf. The rate of CO<sub>2</sub> out-gassing into the atmosphere varied from 0.8 to 137.9 mmol m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> with an average value of 31.3 mmol m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>. Higher spatial variability of the studied hydrochemical and hydro-optical parameters was observed in the middle course, which was determined by the river hydrograph and the influence of the tributaries. The observed differences in the average values of the studied parameters, calculated for two sections of the river, were determined, first of all, by the phase of the river runoff – a high rainfall flood in the middle course and a period of summer dry season – in the lower one. The analysis of the qualitative composition of dissolved organic matter (DOM), based on its optical characteristics, showed the presence of more labile DOM in the middle stem of the river as compared to the lower one. A relationship has been established between the optical characteristics and composition of DOM with the concentrations of dissolved CO<sub>2</sub> in the Lena River's main stem. It is shown that optical parameters are a useful tool for understanding the dynamics and quality of river DOM and its relationship with CO<sub>2</sub> fluxes in Arctic rivers.

*Keywords:* Arctic rivers, dissolved carbon, carbonate system, CO<sub>2</sub> fluxes, permafrost, climate