

ДИНАМИКА БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРИУСТЬЕВом РАЙОНЕ РЕКИ ЛЕНЫ: РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕДИЦИЙ В СЕНТЯБРЕ 2015 И 2017 гг.

П. Н. Маккавеев, А. А. Полухин, А. М. Селиверстова, С. В. Степанова
ФГБУН Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва, Российская Федерация)

А. Л. Чульцова
Северо-Западное отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН
(Архангельск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 20 марта 2018 г.

Представлены результаты исследований гидрохимической структуры вод в приустьевом районе дельты Лены, а также в центральной части шельфа и в области континентального склона моря Лаптевых. Представлены результаты расчетов динамики растворенных форм кремния и фосфора в зоне смешения река-море. Наиболее активное поступление кремния и фосфора наблюдается в придонном слое и сопровождается уменьшением содержания и степени насыщения вод кислородом.

Ключевые слова: море Лаптевых, речной сток, зона смешения, гидрохимическая структура, биогенные элементы, динамика, биопродуктивность

Введение

Общий объем поверхностных и подземных вод, впадающих в Северный Ледовитый океан, оценивался в среднем величиной 5220 км³ в год, модуль стока составляет 355 мм в год, что почти вдвое превышает величину для Мирового океана [1]. Для моря Лаптевых средний годовой материковый сток составляет 745 км³. Но при обилии материкового стока, куда входят не только воды различных водотоков, но и сток при деградации мерзлотных пород, продукционные характеристики морей Арктики убывают от Баренцева моря до Восточно-Сибирского [2—4].

Если рассматривать общее воздействие речного стока на продуктивность арктических морей, можно сделать несколько неожиданный вывод: обилие речного стока в акватории моря слабо влияет на продукционные характеристики вод. Заметное повышение продукции наблюдается непосредственно в приустьевых районах. Для основной акватории воздействие речного стока на морские экосистемы иногда становится негативным. Во-первых, это ухудшение вертикального обмена и, следовательно, поступления биогенных элементов из более глубоких

слоев. Во-вторых, из-за низкой прозрачности речных вод (повышенной мутности и цветности воды) происходит уменьшение толщины фотического слоя [5]. В-третьих, выносимые реками биогенные элементы часто с трудом потребляются морскими продуцентами, поскольку только около 5% органического вещества, выносимого реками, лабильно, а основная его часть устойчива к разложению особенно в условиях высоких широт [6]. И наконец, биологическая продуктивность вод морей связана не только с обилием первичного питательного субстрата (биогенных элементов), но и со стабильностью условий обитания. Частая смена соленых и пресных вод приводит к подавлению развития морской биоты [5; 7]. Это поддерживает значительный интерес к изучению стока сибирских рек и его вклада в баланс биогенных элементов морей.

Район исследований

Лена — крупнейшая река, впадающая в море Лаптевых. На ее долю приходится около 70% всего материкового стока в море [8]. Средний расход реки — 527 км³ в год. Межгодовая изменчивость стока невелика. Лена характеризуется высоким летним паводком и очень низким уровнем воды в зимнее время. На период половодья (май-июль) приходится

60—70% годового стока. В августе-октябре наступает меженно-паводочный сезон, с ноября по апрель — зимняя межень [9—11]. В низовьях Лены 50% стока образуется от таяния снега, 35% — за счет дождевых осадков, а 15% поставляют грунтовые подмерзлотные воды. В зимнее время водное питание Лены осуществляется преимущественно через подрусловые талики. Зимние концентрации растворенных химических элементов в речном стоке увеличиваются в несколько раз благодаря смене режима питания [12]. В зимний период, когда атмосферные, склоново-грунтовые и почвенно-грунтовые источники питания практически полностью подавляются, основную роль играют подземные источники [13—15]. Значительно падает расход воды, содержание биогенных элементов возрастает, особенно концентрации кремния, нитратной и аммонийной форм азота.

Для вод юго-восточной части моря Лаптевых сток Лены служит одним из основных факторов, формирующих гидрологические и гидрохимические черты вод и особенности функционирования морских экосистем [16]. Благодаря обильному материковому стоку формируется поверхностная структурная зона с большими вертикальными и горизонтальными градиентами солености [17]. Сильные шторма способны разрушить плотностную стратификацию и перемешать воду до значительных глубин, однако стратификация быстро восстанавливается. В зависимости от объема речного стока и типа атмосферных процессов воды реки могут переноситься на север до острова Котельный, на восток до пролива Дмитрия Лаптева и даже до пролива Лонга [17—19].

Материалы и методы

Воды приустьевом района Лены исследовались во время экспедиций Института океанологии РАН на научно-исследовательском судне «Академик

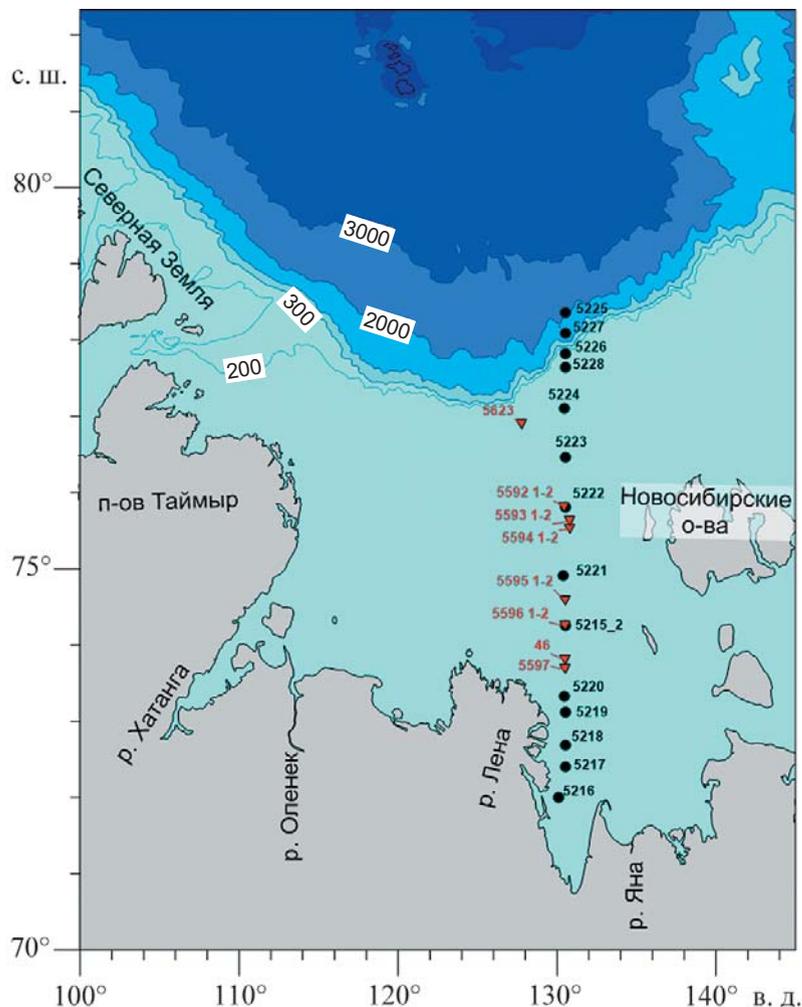


Рис. 1. Расположение станций в приустьевом районе реки Лены, где проводились гидрохимические работы в 2015 г. (черный круг) и 2017 г. (красный треугольник)

Мстислав Келдыш» в 2015 и 2017 гг. (63-й и 69-й рейсы). Схема работ приведена на рис. 1. Южная часть разреза в 2015 г. подходила к Трофимовской протоке, на которую приходится более 60% стока реки [11]. Исследования на разрезе проводились в 2015 г. с 8 по 15 сентября, длина разреза составила более 700 км. В 2017 г. работы велись дважды: 2—3 сентября (длина разреза 250 км) и 14 сентября (длина разреза 200 км). Все съемки были сделаны в один летне-осенний меженно-паводочный сезон, суммарный сток в это время в среднем составляет около трети годового объема [11].

Отбор проб проводился с применением комплекса ROSETTE, оснащенного двенадцатью пятилитровыми пластмассовыми батометрами Нискина (General Oceanic), и CTD-зонда SBE 911 Plus, регистрировавшего электропроводность, температуру и давление. В обеих экспедициях гидрохимические определения велись по методикам, принятым в отечественной океанологической практике [20—22].

При работе в водах с большим количеством взвешенного вещества в зоне смешения речных и морских вод пробы предварительно фильтровались через фильтры 0,45 мкм. В пробах с заметной окраской воды колориметрические определения минерального фосфора и силикатов корректировались на цветность вод по методике [21]. Величина pH определялась в открытой ячейке в единицах шкалы

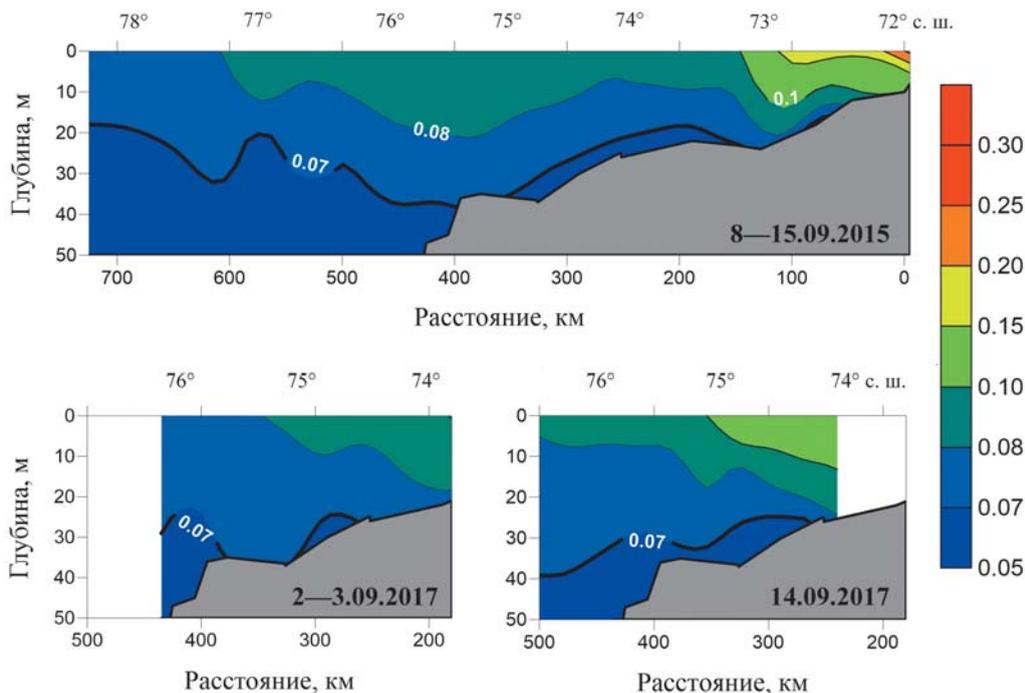


Рис. 2. Распределение величины УЩ (усл. ед.) по результатам работ в 2015 и 2017 гг.

NBS и приводилась к условиям *in situ* [22]. Расчет карбонатной системы проводился рН-Алк методом [22; 23] с применением концентрационных констант диссоциации угольной кислоты по работе [24] с поправками для вод с минерализацией, отличной от морской воды [25; 26]. Использование при обеих съемках единых методик, стандартов и оборудования позволило корректно сравнивать исследования разных лет.

Результаты и обсуждение

Распространение пресных вод

Для всех съемок распределение солености по разрезу было обычным для эстуарного фронта крупной реки. Прослеживается так называемый горизонтальный фронт, неоднократно нарушаемый в результате меандрирования струи речных вод. В общем соленость возрастает с глубиной и по направлению к морской части разреза. Одним из наиболее распространенных и надежных индикаторов присутствия речных вод признается величина отношения общей щелочности к солености Alk/S , называемого удельной щелочностью (УЩ). В речных водах величина общей щелочности Alk будет ниже, но величина отношения Alk/S будет значительно выше, чем в морских водах. Изменение солености может происходить и под влиянием таяния льдов (морских, речных, материковых), атмосферных осадков, деградации мерзлоты и пр. Но изменение соотношения Alk/S происходит под влиянием именно речного стока. При Alk/S более 0,06—0,08 можно уверенно говорить о значительном присутствии речных вод [18; 27].

По результатам двух съемок 2017 г. на Ленском разрезе значение УЩ изменялось от 0,068 до

0,160 усл. ед. (рис. 2). В 2015 г. диапазон изменения УЩ был шире, от 0,060 до 0,360 усл. ед., но это следствие большей длины разреза. Если сравнить изменения УЩ на участке от 74° до 77° с. ш., то в 2015 г. диапазон составил от 0,068 до 0,094, т. е. разрез в 2015 г. был в меньшей степени подвержен воздействию речного стока. Максимальное присутствие речных вод отмечалось в поверхностном слое самой южной станции разреза. Нижняя граница проникновения речных вод за все съемки мало изменила свое положение, находясь на глубине от 20 до 40 м.

Следует отметить, что разрезы 2015 и 2017 гг. не достигали чисто речной воды. В 2015 г. минимальная соленость в мористой части разреза составляла 3,01 psu. Во время первой съемки 2017 г. удалось достичь только до солености 13,40 psu, а при проведении второй минимальная отмеченная соленость составила 6,61 psu. Из-за этого для характеристики гидрохимических параметров в речных водах применен регрессионный анализ [27; 28].

Гидрохимическая структура вод исследуемой акватории

Концентрация растворенного кислорода O_2 в 2015 г. на разрезе варьировала от 4,99 до 8,04 мл/л с минимумом в придонных водах речной части разреза [29]. В 2017 г. содержание O_2 по результатам обеих съемок менялось от 5,24 до 8,50 мл/л. Пониженное содержание O_2 отмечено в придонном слое речной части разреза, а максимум — в мористой части разреза на нижней границе термоклина (примерно на горизонте 20 м), где происходит резкое падение температуры (рис. 3).

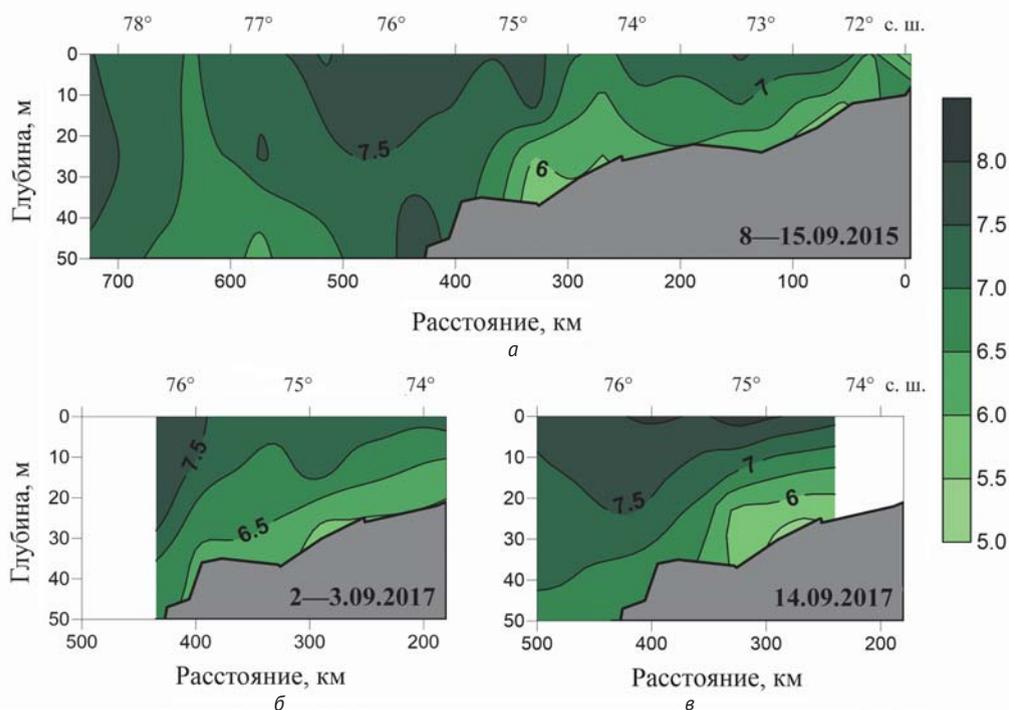


Рис. 3. Распределение растворенного кислорода (мл/л) по результатам работ в 2015 и 2017 гг.

Минимальное содержание O_2 в 2017 г. отмечено в придонных водах между 74° и 75° с. ш. на станциях, где в поверхностных водах наблюдалось понижение солёности (менее 20 psu).

Насыщение воды кислородом на протяжении всего разреза даже на поверхности не поднималось выше 97% в 2015 г. [29] и почти достигло 100% в 2017 г. Отсюда следует, что все съёмки проходили на спаде биологической активности, когда окисление органического вещества (ОВ) уже преобладало над его продуцированием. Сравнение вертикальной структуры распределения O_2 между съёмками различных годов показало незначительные изменения профиля. У дна насыщение O_2 опускалось до 61—64% по результатам всех съёмок. Значительное недосыщение связано, по-видимому, с активными процессами окисления ОВ, поступающего с речным стоком.

Распределение pH характеризуется минимальными величинами в придонном слое речной части разреза и ростом значений по мере усиления влияния морских вод (рис. 4). Максимальная величина pH, как и кислорода, наблюдалась в мористой части разреза на верхней границе скачка температуры. Абсолютная величина pH значительно менялась от съёмки к съёмке. В 2015 г. диапазон изменения pH в слое 0—50 м составлял 7,32—7,99. В 2017 г. наблюдавшаяся в этом слое величина pH была выше: во время первой съёмки она составляла от 7,80 до 8,13, а во время второй — от 7,60 до 8,39. Такое увеличение величины pH в 2017 г. можно связать с небольшим повышением содержания O_2 по сравнению с 2015 г. Температура воды в слое 0—10 м в 2015 г. была от 3 до $4,8^\circ\text{C}$, во время первой съёмки 2017 г. — от

2,1 до $4,3^\circ\text{C}$, а во время второй — от 2,1 до $4,6^\circ\text{C}$. Такое изменение температуры поверхностного слоя почти не могло отразиться на величине pH. Вероятнее всего, в 2015 г. активнее протекали процессы окисления ОВ, чем в 2017 г.

Содержание растворенного кремния Si в 2015 г. изменялось от 2,2 до $66,6 \mu\text{M}$. По результатам регрессионного анализа в чисто речных водах содержание Si могло незначительно превосходить $70 \mu\text{M}$. Наибольшие концентрации Si (более $50 \mu\text{M}$) наблюдались в поверхностных водах на южных станциях разреза, близких к дельте Лены.

Ниже, в слое скачка гидрофизических параметров, концентрация Si опускалась до $30 \mu\text{M}$ и далее ко дну снижалась до $25 \mu\text{M}$. По мере усиления влияния морских вод концентрация Si снижалась по всему профилю, изменялась и структура вертикального распределения (рис. 5). Распределение Si приобретало черты, характерные для зоны смешения: наблюдался поверхностный максимум, который подстилался слоем с большими градиентами, ниже был расположен подповерхностный минимум, ко дну наблюдалось небольшое увеличение концентрации [29].

В 2017 г. содержание Si в исследуемой акватории было от 1,1 до $29,7 \mu\text{M}$ во время первой съёмки и от 2,5 до $39,7 \mu\text{M}$ во время второй. Содержание в речных водах было оценено как $49,3—49,7 \mu\text{M}$. Можно предположить, что увеличение диапазона наблюдавшихся величин связано с увеличением влияния речного стока. Граница влияния стока, прослеживаемая по изолинии растворенного Si $10 \mu\text{M}$ [8], продвинулась на 50 км севернее. Во время первой съёмки 2017 г. выделялся максимум

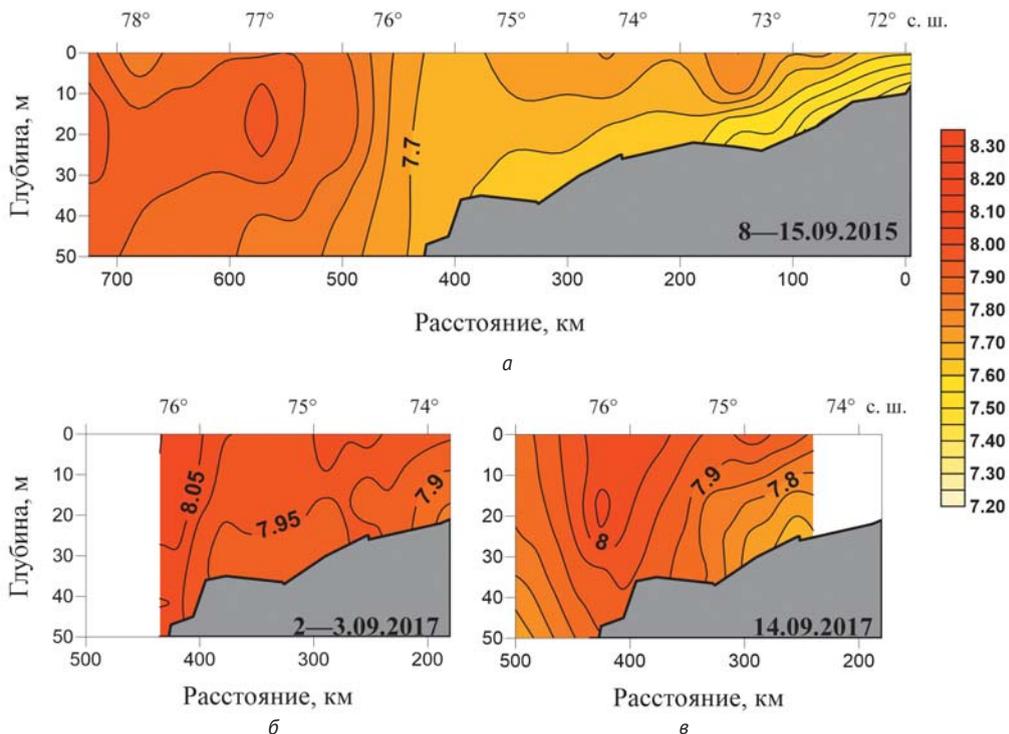


Рис. 4. Величина pH (ед. шкалы NBS) по результатам работ в 2015 и 2017 гг.

в поверхностном слое на самой южной станции разреза (17,7 μM), во время второй содержание Si здесь стало практически в два раза выше. Кроме того, судя по содержанию Si в толще воды, изменилась структура фронтальной зоны. При первых работах фронт был практически вертикален, а при повторных работах его можно охарактеризовать

как комбинированный с преобладанием горизонтального распространения.

Отличительной особенностью распределения растворенного неорганического (минерального) фосфора P_{min} по результатам всех съемок было увеличение его концентрации в придонных горизонтах в обла-

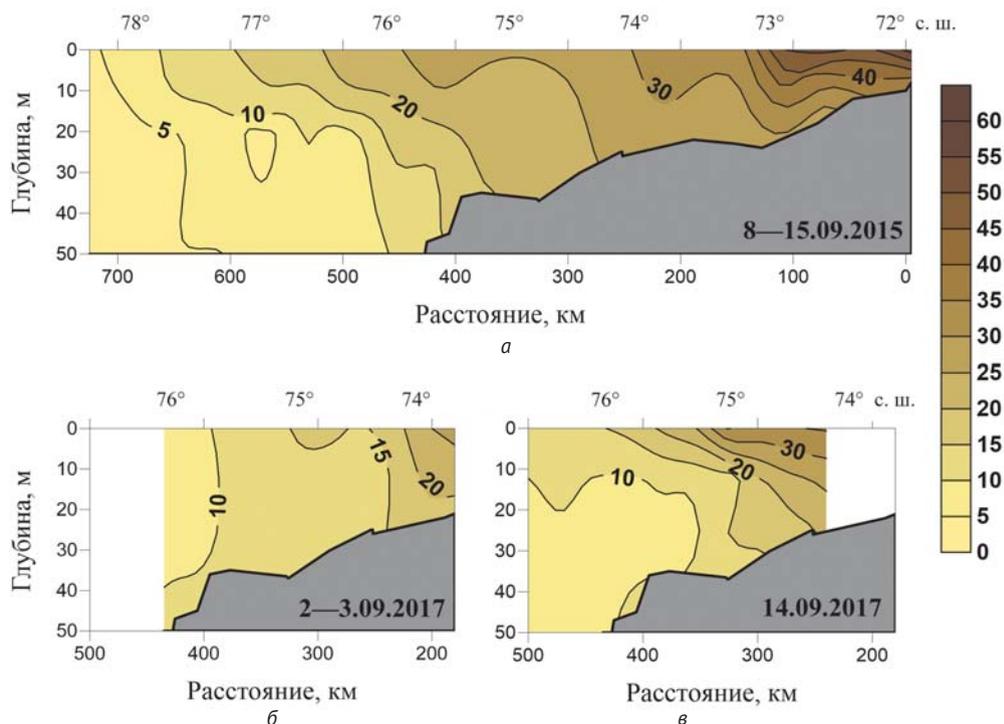


Рис. 5. Распределение растворенного кремния (μM) по результатам работ в 2015 и 2017 гг.

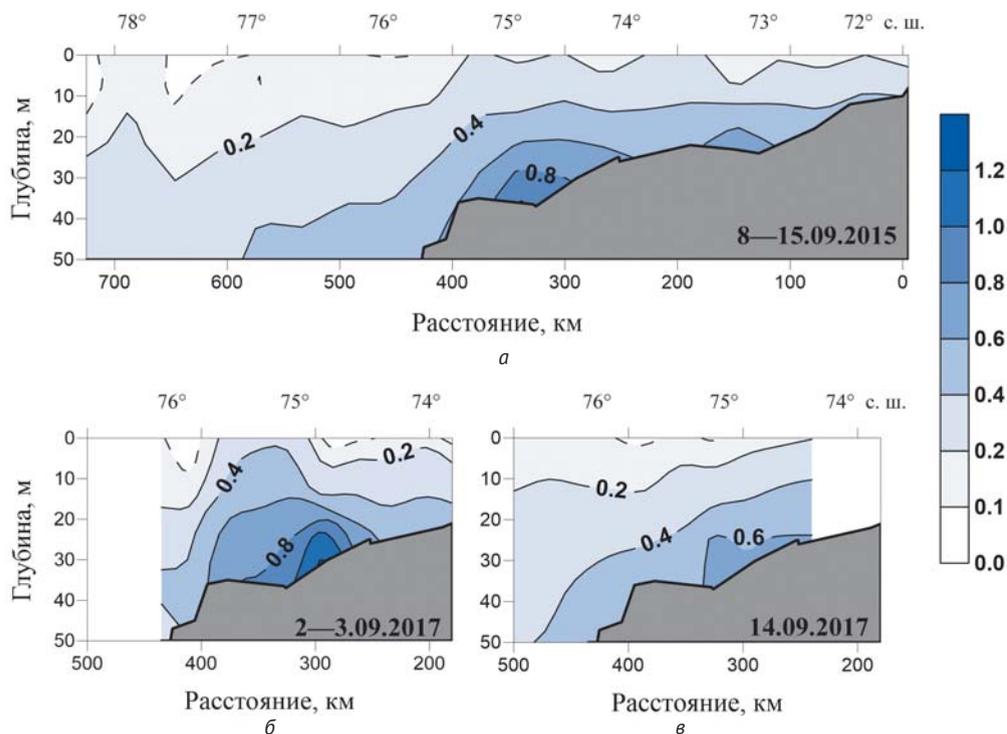


Рис. 6. Распределение растворенного неорганического фосфора (μM) по результатам работ в 2015 и 2017 гг.

сти влияния материкового стока (рис. 6), совпадавших с понижением содержания O_2 .

В 2015 г. содержание P_{\min} на разрезе было от 0,07 до 1,22 μM [29]. В поверхностном слое его содержание менялось от 0,09 до 0,16 μM . В 2017 г. содержание P_{\min} в воде на разрезах изменялось от аналитического нуля до 1,37 μM во время первой съемки и от 0,08 до 0,67 μM во время второй съемки. Локальный максимум (до 0,75 μM) наблюдался в придонном слое на станции в центральной части разреза, на повторном разрезе он не выделялся. Во время первой съемки в верхнем 10-метровом слое содержание P_{\min} не превышало 0,1 μM , а во время второй — увеличивалось до 0,2 μM . На обоих разрезах видно увеличение содержания P_{\min} в водах от поверхности к дну. Судя по величине содержания P_{\min} в исследуемом районе, развитие фитопланктона могло быть лимитировано его малой концентрацией в деятельном слое. В целом структура распределения P_{\min} и его абсолютные величины в 2017 г. сопоставимы с результатами исследований 2015 г. В речных водах содержание P_{\min} оценивалось от 0 до 0,05 μM .

Минеральные формы азота. Содержание нитратного азота NO_3^- в 2015 г. было от 0,14 до 17,33 μM . Как и содержание P_{\min} , содержание NO_3^- увеличивалось в придонном слое речной части разреза (рис. 7). В 2017 г. концентрация NO_3^- в водах разреза изменялась от аналитического нуля до 6,6 μM в обеих съемках. Верхний 20-метровый слой моря содержал всего 0,1 μM NO_3^- и менее. С глубиной его содержание увеличивалось. Можно предположить, что в поверхностном слое содержалось меньше

NO_3^- , чем необходимо для развития фитопланктона. В случае недостатка NO_3^- развитие продукционных процессов могло идти либо за счет рециклинга биогенных элементов, либо при использовании других, менее окисленных форм минерального азота.

Содержание азота нитритов NO_2^- в 2015 г. варьировало от аналитического нуля до 0,97 μM . Максимальное содержание NO_2^- отмечено в поверхностных водах южной части разреза. Вероятно, это результат локального загрязнения вод на поверхности. Другая область повышенного содержания NO_2^- (до 0,36 μM) отмечена в придонных водах центральной части разреза у свала глубин. В 2017 г. концентрация NO_2^- на разрезе была относительно низка, от аналитического нуля до 0,13 μM во время первой съемки до 0,10 μM во время второй. Максимальные значения наблюдались в придонном слое, где скапливается и окисляется наибольшее количество ОВ. Содержание NO_2^- в 2017 г. было значительно ниже, чем в 2015-м. Возможно, это свидетельствует о меньшей интенсивности процессов окисления ОВ и более высоком рН, отмеченном на разрезе.

В 2015 г. минимальное содержание аммонийного азота NH_4^+ (аналитический нуль) было зарегистрировано в придонных водах центральной части разреза. Максимальная концентрация NH_4^+ (до 2,15 μM) была обнаружена также в придонном горизонте, но в речной части. Во время первой съемки 2017 г. на разрезе содержание NH_4^+ менялось от 0,17 до 1,54 μM . При второй съемке его концентрация существенно снизилась, диапазон изменений составил от 0,09 до 0,55 μM . Максимум NH_4^+ наблюдался в придонном слое в области максимального влияния речного стока.

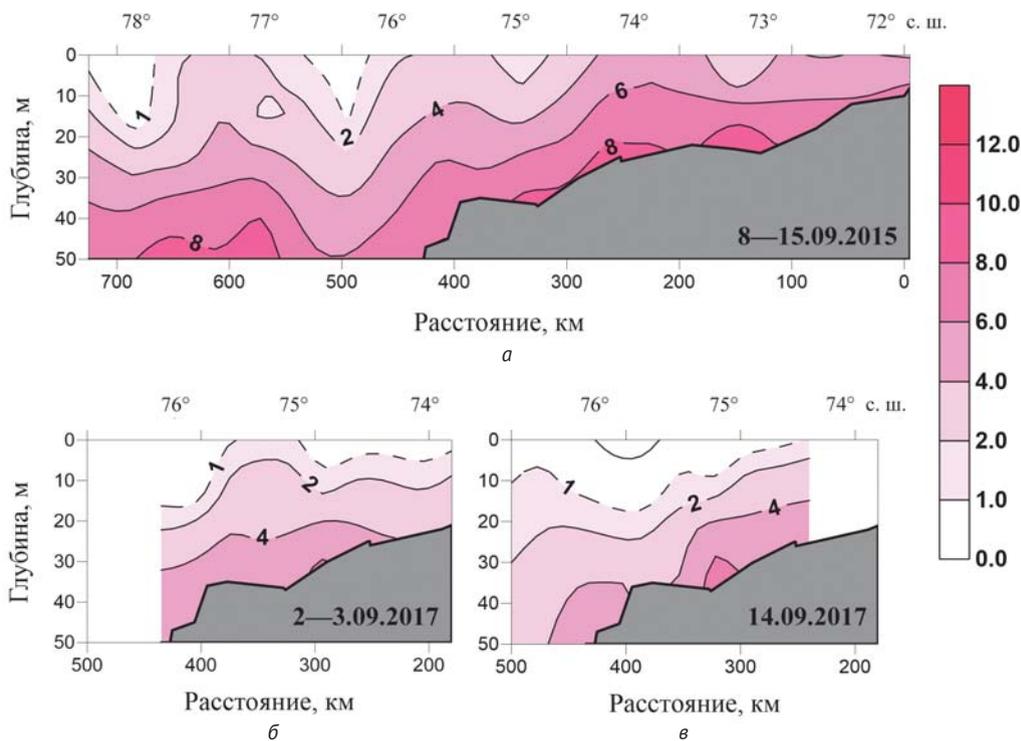


Рис. 7. Содержание нитратного азота (μM) по результатам работ в 2015 и 2017 гг.

То, что во время повторных работ на разрезе содержание NH_4^+ во всей толще воды снизилось в два-три раза, указывает на замедление процесса окисления OB и перехода азота в окисленную форму. По всем съемкам распределение NH_4^+ характеризуется снижением по мере усиления влияния морских вод.

Динамика биогенных элементов в зоне смешения

Для определения потенциальной активности процессов синтеза и деструкции OB был проведен расчет динамики содержания растворенного P_{min} и Si по линии смешения река-море. Методика расчета, ранее примененная для описания динамики растворенного неорганического углерода в зоне контакта морских и речных вод, подробно изложена в [30]. Отрицательная величина разности реально наблюдавшейся величины содержания того или иного гидрохимического параметра с расчетной означает, что происходит поглощение данного вещества, положительная — что имело место выделение этого вещества в воду. Распределение изменения растворенного неорганического кремния ΔSi по разрезу показано на рис. 8.

В придонных водах повсеместно наблюдается положительная величина ΔSi , там происходит выделение Si из верхней части осадков. Поглощение отмечается практически во всей толще поверхностного слоя. В 2015 г. диапазон ΔSi был от $-14,0$ до $24,1 \mu\text{M}$, среднее по всему разрезу — $1,6 \mu\text{M}$. В 2017 г. во время обеих съемок диапазон изменения Si был от -6 до $13 \mu\text{M}$. Средняя величина ΔSi по данным первой съемки была $2 \mu\text{M}$, а по второй — близка к нулю. Как уже говорилось, невысокое содержание

O_2 и низкая степень насыщения вод позволяют с большой вероятностью соотнести убыль Si в поверхностных водах с геохимическими процессами на геохимическом разделе река-море, а не с жизнедеятельностью фитопланктона.

Динамика растворенного неорганического фосфора ΔP имеет схожий вид с величиной ΔSi в речной части разрезов (рис. 9). В морской части наблюдаются существенные отличия ΔP от ΔSi . Связано это, вероятно, с тем, что фосфор, находящийся в составе растворенного и взвешенного органического вещества, более лабилен, чем кремний, и скорее может переходить в растворенные неорганические соединения. В 2015 г. диапазон ΔP составлял от $-0,2$ до $0,8 \mu\text{M}$, средняя величина по всему разрезу была близка к нулю. В 2017 г. во время обеих съемок диапазон изменения ΔP составлял от $-0,8$ до $0,5 \mu\text{M}$. Средняя величина ΔP по первой съемке была близка к нулю, а по второй — близка к $0,15 \mu\text{M}$.

Исходя из расчетов, можно выделить три типа вод в исследуемом районе: поверхностные воды, изменяющие свои свойства по мере усиления влияния морских вод; морские воды, напрямую не подверженные влиянию речного выноса; придонные воды в речной части разрезов с соленостью, повышенной относительно поверхностных вод. Последние находятся под сильным влиянием обмена с верхним слоем донных осадков.

В 2015 и 2017 гг. на некоторых станциях разрезов проводился отбор проб придонной воды с помощью трубок Ниёмисто (шесть станций в 2015 г. и три в 2017 г.). Отбор проб проводился посредством сифона придонной воды из слоев $0-15 \text{ см}$, $15-30 \text{ см}$

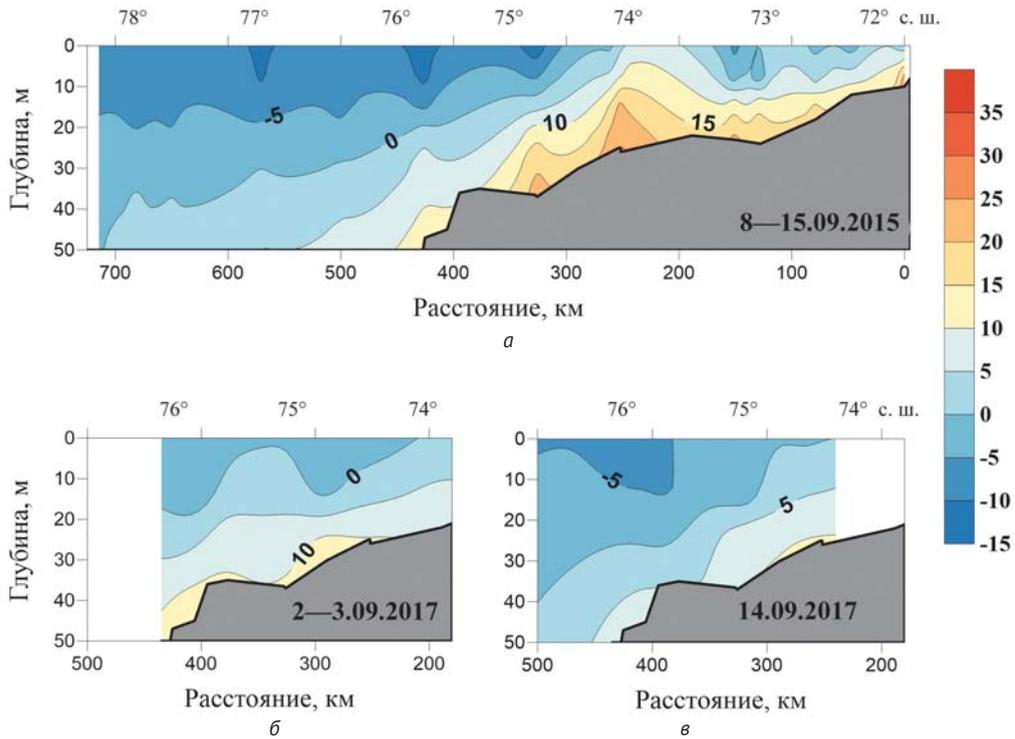


Рис. 8. Области выделения и поглощения растворенного кремния ΔSi (μM) по результатам работ в 2015 и 2017 гг.

и 30—45 см над осадком. В отобранной воде определялось содержание O_2 , общего углерода (рН-Алк методом), Si, общего фосфора P_{tot} и общего растворенного азота N_{tot} . Придонные воды станций, наиболее близких к дельте Лены, отличались повышенными величинами Alk, концентрацией P_{min} и Si. Содержание O_2 , напротив, было пониженным. Такое

изменение гидрохимических параметров на станциях речной части разрезов вызвано разложением ОВ аллохтонного происхождения.

Но в ряде случаев на станциях, расположенных у свала глубин, содержание O_2 непосредственно в придонном слое и в наилке было выше, чем в вышележащих слоях. Содержание P_{min} , различных

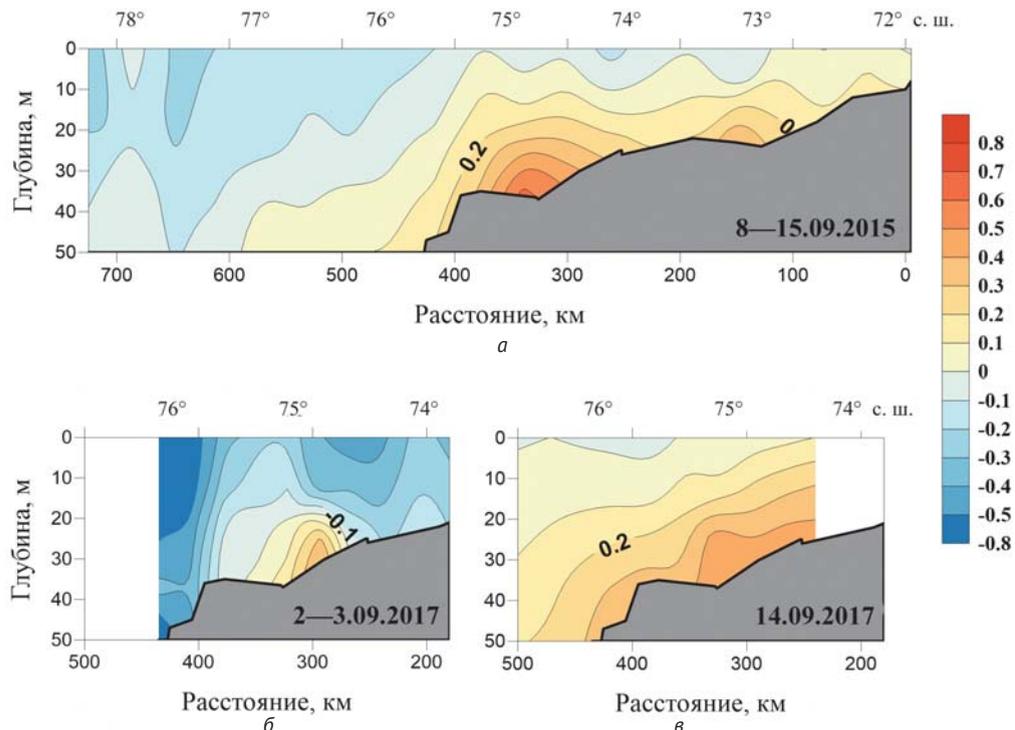


Рис. 9. Области выделения и поглощения растворенного неорганического фосфора ΔP (μM) по результатам работ в 2015 и 2017 гг.

форм азота и Si, напротив, было ниже, чем в 2—3 м над слоем осадка. Это противоречит общепринятой теории, согласно которой именно в придонном слое воды происходят активные процессы окисления органического вещества, поступающего из вышележащих слоев, и должно наблюдаться уменьшение содержания растворенного кислорода и величины рН. Содержание биогенных элементов и растворенного неорганического углерода, наоборот, должно увеличиваться. Мы же в ряде случаев наблюдали противоположную картину распределения гидрохимических параметров в придонном слое. При этом наблюдалось и уменьшение показателя мутности воды в придонном слое, т. е. вода была «чище», содержала меньше взвешенного вещества, что тоже не характерно для придонных вод (данные В. А. Артемьева). Чтобы объяснить это, можно предположить общий механизм увеличения O_2 в придонном слое с инверсией мутности — «наполнение» вод с других участков, содержащих больше OB и взвеси. Непосредственно над осадком оставался относительно тонкий (до метра) слой воды с совершенно другими характеристиками.

Заключение

Исходя из наблюдений в море Лаптевых на разрезе от дельты Лены, можно сделать ряд выводов:

- Структура распределения гидрохимических параметров в 2015 и 2017 гг. имеет схожие черты. Свя-зано это в первую очередь с основным фактором, определяющим гидрологический и гидрохимический режимы района, — стоком Лены. Существенное воздействие материкового стока распространяется на весь верхний деятельный слой исследованной акватории. Глубина слоя скачка плотности сильно изменялась от станции к станции, но в целом увеличивалась с юга на север от 3—4 м до 15 м по мере усиления влияния морских вод. По результатам всех съемок на поверхности в центральной части разреза наблюдается присутствие более соленых, чем окружающие, вод. Данный факт можно объяснить интрузией вод с повышенной соленостью или орографическим апвеллингом. Сходство гидрохимической структуры по результатам всех съемок связано и с тем, что все они проходили примерно в одно время года — конец осенне-летнего и начало зимнего сезона.
- Можно констатировать существенное воздействие материкового стока на верхний деятельный слой в центральной части моря. Отчетливо речные воды проявляются в слое до 20—40 м, где наблюдалось и низкое содержание фосфатов, нитритного и нитратного азота, повышенное содержание растворенного кремния. Хотя для вод с сильным влиянием речного стока характерно повышенное содержание органического азота и фосфора, минеральные формы азота и фосфора могут снижаться практически до нулевых значений. Это может быть связано с исчерпанием доступных биогенных элементов еще при выходе из устья рек, а также

с тем, что основная часть OB , выносимого реками, относится к стойкому виду и может значительное время не окисляться. Приток биогенных элементов из нижележащих слоев затруднен сильной стратификацией вод.

- В исследуемой акватории по результатам всех съемок окисление OB преобладало над процессами его синтеза во всем столбе воды. На это указывает то, что насыщение вод кислородом нигде не достигало 100%. В то же время и не наблюдалось наличия так называемых застойных вод с насыщением кислородом 30—50%, которые считаются особенностью придонной структурной зоны юго-восточной части моря Лаптевых, подверженной сильному влиянию речного стока. Низкое содержание и недосыщение вод растворенным кислородом в придонном слое сопровождалось выделением в воду фосфатов и кремния ΔP и ΔSi , что практически однозначно связано с деструкцией OB в поверхностном слое осадков. Но в отдельных случаях наблюдалась инверсия гидрохимических параметров в придонных водах, содержание кислорода возрастало, а содержание биогенных элементов уменьшалось непосредственно у поверхности осадка.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО (тема № 0149-2018-0035).

Литература

1. Гордеев В. В. Речной сток в океан и черты его геохимии. — М.: Наука, 1983. — 160 с.
2. Ветров А. А., Романкевич Е. А. Первичная продукция и потоки углерода на дно в арктических морях Евразии в 2003—2012 гг. // Докл. Акад. наук. — 2014. — Т. 454, № 1. — С. 97—99.
3. Романкевич Е. А., Ветров А. А. Цикл углерода в арктических морях России. — М.: Наука, 2001. — 302 с.
4. Яшинов В. А. Планктонная продуктивность северных морей СССР. — М.: Искра революции, 1940. — 85 с.
5. Маккаев П. Н. Влияние материкового стока на гидрохимический режим Карского моря // Экосистема Карского моря — новые данные экспедиционных исследований: Материалы научной конференции. — М.: АПР, 2015. — С. 50—53.
6. Dittmar T., Kattner G. The biogeochemistry of the river and shelf ecosystem of the Arctic Ocean: a review // Marine Chemistry. — 2003. — Vol. 83. — P. 103—120.
7. Кучерук Н. В., Маккаев П. Н. Влияние изменчивости гидрохимических и гидрофизических условий на состояние донных сообществ на примере юго-восточной части Баренцева моря // Академическая наука и ее роль в развитии производительных сил в северных районах России: Материалы всероссийской конференции с международным участием (Архангельск, 19—22 июня 2006 г.). — (CD-ROM).
8. Пивоваров С. В. Химическая океанография арктических морей России. — СПб.: Гидрометеиздат, 2000. — 86 с.

9. Ресурсы поверхностных вод СССР. — Т. 17: Лено-Индигирский район / Под ред. А. В. Шестакова. — Л.: Гидрометеиздат, 1967. — 312 с.
10. Соколов А. А. Гидрография СССР. — Л.: Гидрометеиздат, 1952. — 287 с.
11. Эстуарно-дельтовые системы России и Китая: гидролого-морфологические процессы, геоморфология и прогноз развития / Под ред. В. Н. Коротаева и др. — М.: ГЕОС, 2007. — 445 с.
12. Зубакина А. Н. Особенности гидрохимического режима устьевой области Лены // Тр. ГОИН. — 1979. — Т. 143. — С. 69—76.
13. Воронков П. П. Гидрохимия местного стока Европейской территории СССР. — Л.: Гидрометеорол. изд-во, 1970. — 187 с.
14. Маккавеев П. Н., Гордеев В. В., Стунжас П. А. и др. Гидрохимический сток р. Оби в зимний период (по материалам работ в декабре 2001 года) // Эколого-биогеохимические исследования в бассейне Оби / Ред. В. В. Зуев, А. В. Куровских, С. Л. Шварцев. — Томск, 2002. — С. 8—20.
15. Пипко И. И., Пугач С. П., Дударев О. В. и др. Карбонатные параметры вод реки Лены: характеристики и распределение // Геохимия. — 2010. — № 11. — С. 1206—1213.
16. Gordeev V. V., Martin J. M., Sidorov I. S., Sidorova M. V. A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean // American J. Science. — 1996. — Vol. 296. — P. 664—691.
17. Савельева Н. И., Салюк А. Н., Пропп Л. Н. Особенности термохалинной и гидрохимической структуры вод юго-восточной части моря Лаптевых // Океанология. — 2010. — Т. 50, № 6. — С. 918—925.
18. Смирнов А. А. Проникновение речных вод в Карское море и море Лаптевых // Тр. Арктич. науч.-исслед. ин-та. — 1955. — Т. 72, вып. 2. — С. 92—104.
19. Pipko I. I., Semiletov I. P., Pugach S. P. et al. Interannual variability of air-sea CO₂ fluxes and carbon system in the East Siberian Sea // Biogeosciences. — 2011. — Vol. 8. — P. 1987—2007.
20. Руководство по химическому анализу морских вод. РД 52.10.242-92. — СПб.: Гидрометеиздат, 1993. — 264 с.
21. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана / Ред. В. В. Сапожников. — М.: Изд-во ВНИРО, 2003. — 202 с.
22. Современные методы гидрохимических исследований океана / Ред. О. К. Бордовский, В. Н. Иваненков; Ин-т океанологии им. П. П. Ширшова. — М.: ИОАН, 1992. — 200 с.
23. Millero F. J. Thermodynamics of the carbon dioxide system in oceans // Geochim. et Cosmochim. Acta. — 1995. — Vol. 59, № 4. — P. 661—677.
24. Edmond J. M. The Carbonic Acid System in Sea Water: Ph. D. Thesis / Univ. of California. — San Diego, 1970. — 174 p.
25. Бычков А. С., Павлова Г. Ю., Кропотов В. А. Карбонатная система // Химия морской воды и аутигенное минералообразование. — М.: Наука, 1989. — С. 49—111.
26. Makkaev P. N. The total alkalinity in the anoxic waters of the Black sea and in sea-river mixture zones / Intergovernmental Oceanographic Commission. Joint IOC-JGOFS CO₂ Advisory Panel Meeting. Seven Session. Annex V. — [S. I.]: UNESCO, 1998.
27. Стунжас П. А. Разделение вод Енисея и Оби в Карском море по щелочности и кремнию // Океанология. — 1995. — Т. 35, № 2. — С. 215—219.
28. Полухин А. А., Маккавеев П. Н. Особенности распространения материкового стока по акватории Карского моря // Океанология. — 2017. — Т. 57, № 1. — С. 25—37.
29. Степанова С. В., Полухин А. А., Костылева А. В. Гидрохимическая структура вод в восточной части моря Лаптевых осенью 2015 г. // Океанология. — 2017. — Т. 57, № 1. — С. 57—66.
30. Маккавеев П. Н. Растворенный неорганический углерод в водах Карского моря и устьях рек Обь и Енисей // Океанология. — 1994. — Т. 34, № 5. — С. 668—672.

Информация об авторах

Маккавеев Петр Николаевич, доктор географических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., 36), e-mail: makkaev55@mail.ru.

Полухин Александр Анатольевич, кандидат географических наук, научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., 36), e-mail: polukhin@ocean.ru.

Селиверстова Анна Михайловна, инженер-исследователь, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., 36), e-mail: 201219941315ann@gmail.com

Степанова Светлана Валерьевна, младший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., 36), e-mail: s.stepanova87@gmail.com.

Чульцова Анна Леонидовна, научный сотрудник, Северо-Западное отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (163013, Россия, Архангельск, Маймаксанское ш., 1), e-mail: an-2345@yandex.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Маккавеев П. Н., Полухин А. А., Селиверстова А. М. и др. Динамика биогенных элементов в приустьевом районе реки Лены: результаты экспедиций в сентябре 2015 и 2017 гг. // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 2 (30). — С. 56—67. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-56-67.

DYNAMICS OF NUTRIENTS IN ESTUARINE AREA OF THE LENA RIVER: RESULTS FROM CRUISES IN SEPTEMBER 2015 AND 2017

Makkaveev P. N., Polukhin A. A., Seliverstova A. M., Stepanova S. V.

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

Chultsova A. L.

Northwestern branch of Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russian Federation)

Abstract

In the paper performed results from observations of hydrochemical structure of estuarine area of the Lena River delta as well as in the central part of the shelf and above the continental slope of the Laptev Sea during 63^d and 69th cruises of R/V "Academik Mstislav Keldysh" in September 2015 and 2017. Despite the large amount of freshwater input (estimated 540 km³/year only from the Lena River), the primary production of the Laptev Sea water is very poor. Except the estuarine area freshwater influence on the sea water could be negative owing to worsening of vertical exchange, decrease of insolation due to raise of turbidity level. Moreover, nutrients coming with the riverine water are hardly consumed by marine organisms. In general, for productivity of seawater it is necessary not only abundance of nutrients but stability of the environment. Our studies included determination of dissolved oxygen, pH, alkalinity and nutrients. Concentration of phosphates and mineral forms of nitrogen was practically close to analytical zero despite significant influence of the continental runoff. Comparison of the structure in 2015 and 2017 showed strong resemblance. In addition, we have calculated dynamics of nutrients in the riverine-sea mixing zone. The most active emission of dissolved silicate and phosphorus was observed in the bottom layer and was accompanied by reduction of dissolved oxygen and oxygen saturation level. Based on the calculations, it is possible to distinguish three types of waters in the study area: surface waters that change their properties as the influence of riverine water decreases, seawater not directly affected by fresh water, and bottom waters in the estuarine area with elevated salinity and affected by exchange with upper layer of sediments.

Keywords: *Laptev Sea, river runoff, mixing zone, nutrients, dynamics, bioproductivity.*

This research was performed in the framework of the state assignment of FASO Russia (theme No. 0149-2018-0035).

References

1. Gordeev V. V. Rechnoi stok v okean i cherty ego geokhimii. [River flow into the ocean and features of its geochemistry]. Moscow, Nauka, 1983, 160 s. (In Russian).
2. Vetrov A. A., Romankevich E. A. Primary production and fluxes of organic carbon to the seabed in the Eurasian Arctic seas, 2003-2012. Doklady Earth Sciences, 2014, vol. 454, no. 1, pp. 44—46.
3. Romankevich E. A., Vetrov A. A. Tsikl ugleroda v arkticheskikh moryakh Rossii. [The carbon cycle in the Arctic seas of Russia]. Moscow, Nauka, 2001, 302 p. (In Russian).
4. Yashnov V. A. Planktonnaya produktivnost' severnykh morei SSSR. [Plankton productivity of the northern seas of the USSR]. Moscow, Iskra revolyutsii, 1940, 85 p. (In Russian).
5. Makkaveev P. N. Vliyaniye materikovogo stoka na gidrokhimicheskii rezhim Karskogo morya. [Influence of the continental runoff on the hydrochemical regime of the Kara Sea]. Ekosistema Karskogo morya — novye dannye ekspeditsionnykh issledovaniy: Materialy nauchnoi konferentsii. Moscow, APR, 2015, pp. 50—53. (In Russian).
6. Dittmar T., Kattner G. The biogeochemistry of the river and shelf ecosystem of the Arctic Ocean: a review. Marine Chemistry, 2003, vol. 83, pp. 103—120.
7. Kucheruk N. V., Makkaveev P. N. Vliyaniye izmenchivosti gidrokhimicheskikh i gidrofizicheskikh uslovii na sostoyaniye donnykh soobshchestv na primere yugo-vostochnoi chasti Barentseva morya. [Influence of variability of hydrochemical and hydrophysical conditions on the state of bottom communities on the example of the south-eastern part of the Barents Sea]. Akademicheskaya nauka i ee rol' v razvitii proizvoditel'nykh sil v severnykh raionakh Rossii: Materialy vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (Arkhangelsk, 19—22 iyunya 2006 g.). (CD-ROM). (In Russian).
8. Pivovarov S. V. Khimicheskaya okeanografiya Arkticheskikh morei Rossii. [Chemical oceanography of the Arctic seas of Russia]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 2000, 86 p. (In Russian).
9. Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. [Resources of surface waters of the USSR]. Vol. 17: Leno-Indigirskii raion. Pod red. A. V. Shestakova. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1967, 312 p. (In Russian).
10. Sokolov A. A. Gidrografiya SSSR. [Hydrography of the USSR]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1952, 287 p. (In Russian).
11. Estuarno-del'tovye sistemy Rossii i Kitaya: gidrologomorfologicheskie protsessy, geomorfologiya i prognoz razvitiya. [Estuarine and riverine delta systems of Russia and China: hydrological-morphological processes, geomorphology and development forecast]. Pod red. V. N. Korotaeva et al. Moscow, GEOS, 2007, 445 p. (In Russian).
12. Zubakina A. N. Osobennosti gidrokhimicheskogo rezhima ust'evoi oblasti Leny. [Features of the hydrochemical regime of the Lena mouth area]. Tr. GOIN, 1979, vol. 143, pp. 69—76. (In Russian).
13. Voronkov P. P. Gidrokhimiya mestnogo stoka Evropeiskoi territorii SSSR. [Hydrochemistry of local runoff

- in the European territory of the USSR]. Leningrad, Gidrometeorol. izd-vo, 1970, 187 p. (In Russian).
14. Makkaveev P. N., Gordeev V. V., Stunzhas P. A. et al. Gidrokhimicheskii stok r. Obi v zimnii period (po materialam rabot v dekabre 2001 goda). [The hydrochemical runoff of the Ob River in winter (based on the work in December 2001)]. *Ekologo-biogeokhimicheskie issledovaniya v basseine Obi*. Red. V. V. Zuev, A. V. Kurovskikh, S. L. Shvartsev. Tomsk, 2002, pp. 8—20. (In Russian).
15. Pipko I. I., Pugach S. P., Dudarev O. V. et al. Carbonate parameters of the Lena River: Characteristics and distribution. *Geochemistry International*. 2010, vol. 48, iss. 11, pp. 1131—1137.
16. Gordeev V. V., Martin J. M., Sidorov I. S., Sidorova M. V. A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean. *American J. Science*, 1996, vol. 296, pp. 664—691.
17. Savel'eva N. I., Salyuk A. N., Propp L. N. Peculiar features of the thermohaline and hydrochemical water structure in the southeastern Laptev Sea. *Oceanology*, 2010, vol. 50, no. 6, pp. 869—876.
18. Smirnov A. A. Proniknovenie rechnykh vod v Karskoe more i more Laptevykh. [Penetration of river waters into the Kara Sea and the Laptev Sea]. *Tr. Arktich. nauch.-issled. in-ta*, 1955, vol. 72, iss. 2, pp. 92—104. (In Russian).
19. Pipko I. I., Semiletov I. P., Pugach S. P. et al. Interannual variability of air-sea CO₂ fluxes and carbon system in the East Siberian Sea. *Biogeosciences*, 2011, vol. 8, pp. 1987—2007.
20. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu morskikh vod. [Guidelines for the chemical analysis of marine waters]. RD 52.10.242-92. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1993, 264 p. (In Russian).
21. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu morskikh i presnykh vod pri ekologicheskom monitoringe rybnokhozyaistvennykh vodoemov i perspektivnykh dlya promysla raionov Mirovogo okeana. [Guidelines for the chemical analysis of marine and fresh water in the environmental monitoring of fishery reservoirs and promising for the fishing areas of the World Ocean]. Red. V. V. Sapozhnikov. Moscow, Izd-vo VNIRO, 2003, 202 p. (In Russian).
22. Sovremennye metody gidrokhimicheskikh issledovaniy okeana. [Modern methods of hydrochemical studies of the ocean]. Red. O. K. Bordovskii, V. N. Ivanenkov. In-t okeanologii im. P. P. Shirshova. Moscow, IOAN, 1992, 200 p. (In Russian).
23. Millero F. J. Thermodynamics of the carbon dioxide system in oceans. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1995, vol. 59, no. 4, pp. 661—677.
24. Edmond J. M. The Carbonic Acid System in Sea Water: Ph. D. Thesis. Univ. of California. San Diego, 1970, 174 p.
25. Bychkov A. S., Pavlova G. Yu., Kropotov V. A. Karbonatnaya sistema. [Carbonate system]. *Khimiya morskoi vody i autigennoe mineraloobrazovanie*. Moscow, Nauka, 1989, pp. 49—111. (In Russian).
26. Makkaveev P. N. The total alkalinity in the anoxic waters of the Black sea and in sea-river mixture zones. Intergovernmental Oceanographic Commission. Joint IOC-JGOFS CO₂ Advisory Panel Meeting. Seven Session. Annex V. — [S. I.]: UNESCO, 1998.
27. Stunzhas P. A. Razdelenie vod Eniseya i Obi v Karskom more po shchelochnosti i kremniyu. [Separation of the waters of the Yenisei and the Ob in the Kara Sea by alkalinity and silicon]. *Okeanologiya*, 1995, vol. 35, no. 2, pp. 215—219. (In Russian).
28. Polukhin A. A., Makkaveev P. N. Features of the continental runoff distribution over the Kara Sea. *Oceanology*, 2017, vol. 57, iss. 1, pp. 19—30.
29. Stepanova S. V., Polukhin A. A., Kostyleva A. V. Hydrochemical structure of the waters in the eastern part of the Laptev Sea in autumn 2015. *Oceanology*, 2017, vol. 57, iss. 1, pp. 58—64.
30. Makkaveev P. N. Rastvorenniy neorganicheskii uglerod v vodakh Karskogo morya i ust'yakh rek Ob' i Enisei. [Dissolved inorganic carbon in the waters of the Kara Sea and the estuaries of the Ob and Yenisei rivers]. *Okeanologiya*, 1994, vol. 34, no. 5, pp. 668—672. (In Russian).

Information about the authors

Makkaveev Petr Nikolaevich, Doctor of Sciences, Chief Researcher, Head of Laboratory, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (36, Nahimovskiy prosp., Moscow, Russia, 117997), e-mail: makkaveev55@mail.ru.

Polukhin Alexander Anatolevich, PhD, Researcher, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (36, Nahimovskiy prosp., Moscow, Russia, 117997), e-mail: polukhin@ocean.ru.

Seliverstova Anna Mikhailovna, Engineer-Researcher, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (36, Nahimovskiy prosp., Moscow, Russia, 117997), e-mail: 201219941315ann@gmail.com.

Stepanova Svetlana Valerievna, Junior Researcher, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (36, Nahimovskiy prosp., Moscow, Russia, 117997), e-mail: s.stepanova87@gmail.com.

Chultsova Anna Leonidovna, Researcher, Northwestern branch of Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (1, Maimaksanskoe shosse, Arkhangelsk, Russia, 163013), e-mail: an-2345@yandex.ru.

Bibliographic description

Makkaveev P. N., Polukhin A. A., Seliverstova A. M., Stepanova S. V., Chultsova A. L. Dynamics of nutrients in estuarine area of the Lena river: results from cruises in September 2015 and 2017. *Arctic: ecology and economy*, 2018, no. 2 (30), pp. 56—67. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-56-67. (In Russian).