

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА И УГЛЕВОДОРОДОВ В МОРЯХ КАРСКОМ И ЛАПТЕВЫХ В АВГУСТЕ – СЕНТЯБРЕ 2018 ГОДА

Е.В. Колтовская¹, И.А. Немировская²

^{1,2} Институт океанологии имени П.П. Шириова РАН, аналитическая лаборатория

¹ Мл. науч. сотр.; e-mail: Koltovskaya.ev@ocean.ru

² Гл. науч. сотр., д-р геол.-минерал. наук; e-mail: nemir44@mail.ru

Изучено распределение взвеси методом фильтрации и величины ее потоков с помощью седиментационных ловушек в Карском и Лаптевых морях (72-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш», август – сентябрь 2018 г.). В составе взвеси определяли органическую компоненту ($C_{\text{орг}}$, липиды и углеводороды) и неорганическую литогенную компоненту (аморфный кремнезем и карбоната кальция). Установлено, что в поверхностных водах содержание взвеси изменялось от 0,2 до 5,9 мг/л (в среднем 0,90 мг/л) с максимумом в заливе Благополучия. Концентрации липидов от 28 до 120 мкг/л (в среднем 52 мкг/л), алифатических углеводородов от 10 до 49 мкг/л (в среднем 22 мкг/л) с максимумом в районе выносов р. Обь (6799 мг/(м²сут)). Поток взвеси уменьшался от поверхностного к придонному горизонту только в заливе Благополучия (от 13 127 до 11 900 мг/(м²сут)), в остальных районах поток возрастал в придонном горизонте. В акватории выноса р. Обь поток взвеси совпадал с максимумом потока $C_{\text{орг}}$ – 682 мгС/(м²сут). В составе взвеси, так же как и в органических соединениях, в том числе углеводородов, аллохтонная компонента в основном преобладала над автохтонной.

Ключевые слова: взвешенное вещество, органическое вещество, нефтяные углеводороды, седиментация, Карское море, море Лаптевых, межень

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.7

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время из-за растущего значения ресурсов арктический регион из периферии превратился в центр международного внимания [Эркин, 2012; АМАР, 2007]. Состояние шельфа краевых арктических морей во многом определяется огромным объемом континентального стока, который оценивается 2300–2500 км³/год, и его трансформацией в области река – море [Флинт и др., 2018]. Взвешенному веществу, а в его составе углеводородам (УВ), соединениям природного и антропогенного происхождения [Вернадский, 2001] в исследованиях арктических морей отводится большое внимание [Буренков и др., 2010; Лисицын и др., 2014; Немировская, 2021]. Геохимический подход делает необходимым исследование взвеси и УВ в ее составе не только как наиболее важных и распространенных загрязняющих веществ, но и требует проведения анализа естественного биогеохимического их круговорота под воздействием разнообразных физико-химических условий.

Для изучения осадкообразования и особенностей поведения взвешенного вещества наряду с фильтрационной взвесью в режиме *in situ* наиболее перспективно использовать седиментационные ловушки [Клювиткин и др., 2019; Лисицын, 2014; Лукашин и др., 2011; Новигатский, 2020; Gardner, 2000; Magen et al., 2010; Лисицын и др., 2014]. Этот

метод позволяет в динамике (во времени) изучать процессы современной седиментации рассеянного вещества и различных компонентов в его составе. Поток взвеси определяется количеством вещества, проходящего через единицу площади в единицу времени (мг/(м²сут)) [Клювиткин и др., 2021], и соответствует абсолютной массе осадконакопления. Вертикальные потоки осадочного вещества – основа для прямых расчетов поступления различных компонентов, в том числе загрязняющих веществ в поверхностный слой донных осадков.

Первые работы, посвященные исследованию осадочного вещества в Центральной Арктике и континентальной окраины Европы, были проведены в 1988–1990 гг. [Antia et al., 2001; Lampitt, Antia, 1997]. При этом изучались отдельные составляющие потока, которые охватывают только верхний деятельный слой океана [Collins et al., 2015; Jonkers et al., 2010]. Кроме того, определяли скорости и основной состав осаждающегося взвешенного вещества. Так, многолетние исследования взвеси в Северном Ледовитом океане (СЛО) показали, что скорость осаднения на континентальном шельфе может достигать 10 мм/год [Лисицын, 2014]. В Белом море величина потока изменялась от 0,4 до 4,2 мм/год [Новигатский, 2020], а в пелагиали СЛО в среднем колебалась около 0,01 мм/год [Новигатский и др., 2021].

Для изучения изменчивости распределения взвеси и ее компонентов в процессе седиментации в период с 16 августа по 20 сентября 2018 г. во время межени (72-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш») было проведено ее исследование в различных районах Карского и Лаптевых морей. Впервые были изучены потоки и состав УВ в седиментационных ловушках.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор проб. Для исследования фильтрационной взвеси пробы воды были собраны батометрами Нискина объемом 10 л на гидрологических станциях

комплексом «Rosette». Положение горизонтов отбора проб выбирали по результатам зондирования температуры, электропроводности, флуоресценции, полученным с помощью буксируемого зонда Idronaut и CTD3 зонда SBE319 Plus (Seabird Electronics, США), снабженного датчиками флуоресценции и мутности.

Для исследования потоков были использованы малые седиментационные ловушки (МСЛ-110) с площадью сбора 0,0095 м², производства ИО РАН [Лукашин и др., 2011]. Ловушка состоит из двух пластиковых цилиндров, внутри которых, в нижней части, вмонтирован конус с резьбой под пробосборник (рис. 1).

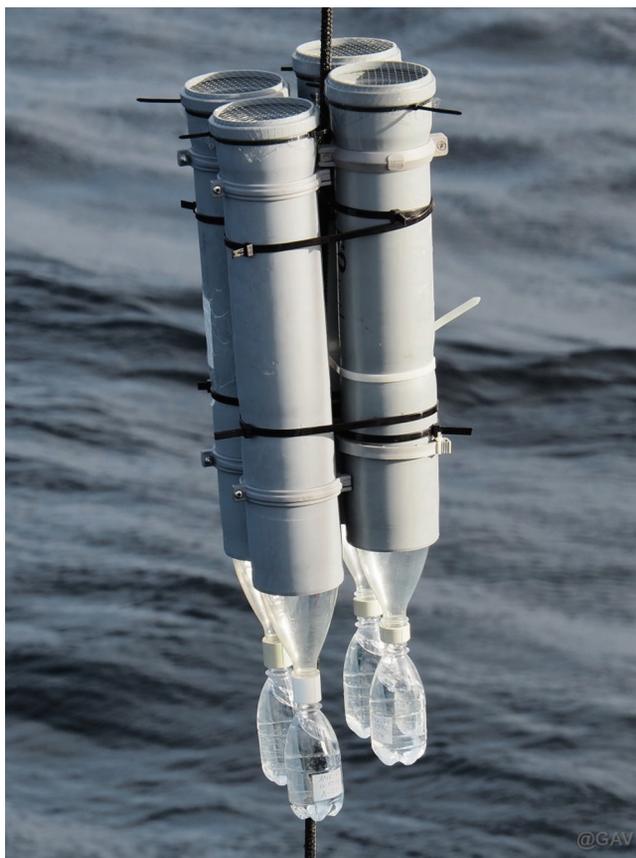


Рис. 1. Общий вид седиментационной ловушки

Fig. 1. General view of a sediment trap

Ловушка крепится на петли буйрепа (капроновый шнур диаметром 12 мм массой 100 г на погонный метр) с помощью фала и пластиковых стяжек. В качестве пробосборников использовали полиэтиленовые флаконы объемом 500 мл, а в качестве якоря – груз весом не менее 120 кг, для плавучести – диски из плотного пенопласта диаметром 107 см, толщиной от 10 см, плотностью 0,12 кг/м³. Седиментационные ловушки устанавливали на двух-трех горизонтах: поверхностный, промежуточный (под термоклином) и придонный слой, на расстоянии около 15 м выше

дна, чтобы исключить попадание материала, взмученного при посадке груза на дно.

Для определения массовой концентрации взвесь (параллельно 3 пробы) фильтровали в судовой лаборатории под вакуумом 400 мбар на предварительно отмытые соляной кислотой и взвешенные мембранные ядерные фильтры с размером пор 0,45 мкм (производство ОИЯИ, г. Дубна). Концентрацию взвеси (после высушивания фильтров) определяли в лабораторных условиях гравиметрически с точностью до $\pm 0,001$ мг.

Для определения органических соединений ($C_{\text{орг}}$, липидов и алифатических углеводородов – УВ) пробу (3–5 л) одновременно фильтровали через прокаленные при температуре 450°C стекловолнистые фильтры Whatman GF/F (размер пор 0,7 мкм) под вакуумом 200 мбар [Немировская и др., 2013].

Содержание органического углерода ($C_{\text{общ}}$ и $C_{\text{орг}}$) определяли методом сухого сжигания на анализаторе АН-7560 (РФ) с подкислением пробы соляной кислотой. Чувствительность метода – 6 мкг углерода в пробе, точность 3–6 относительных процента [Люцарев, 1986].

Биогенная компонента взвеси определялась по сумме трех компонентов: органического вещества (ОВ), карбонатного материала и аморфного кремнезема. ОВ рассчитывалось умножением величины $C_{\text{орг}}$ на 2, согласно методике [Лисицын и др., 2015]. $C_{\text{карб}}$ вычисляли по разности между $C_{\text{общ}}$ и $C_{\text{орг}}$, к CaCO_3 переходили через массовую долю углерода (умножением $C_{\text{карб}}$ на 100/12) [Лукашин и др., 2011].

Аморфный кремнезем ($\text{SiO}_{2\text{аморф}}$), являющийся индикатором кремнистых панцирей диатомовых водорослей, рассчитывали методом терригенной матрицы по Al-модулю с учетом разницы содержания валового кремнезема и терригенного [Лисицын и др., 2015].

Литогенная компонента взвеси рассчитывалась по содержанию Al методом терригенной матрицы [Клювиткин и др., 2019].

Si и Al определяли фотометрическим методом с точностью 2–5%. Определение аморфного кремнезема ($\text{SiO}_{2\text{аморф}}$) проводили фотоколориметрическим методом по восстановленной форме кремнемолибденовой гетерополикислоты после двукратной содовой вытяжки [Лукашин и др., 2011].

Вещественный состав ловушечного материала изучали с помощью сканирующего электронного

микроскопа VEGA-3 TESCAN (Чехия) с системой рентгеноспектрального микроанализа Oxford INCA Energy 350 (Великобритания).

Из проб взвесей на ультразвуковой бане «Сапфир» метилхлоридом экстрагировали суммарную органическую фракцию (липиды). Концентрацию липидов (до колоночной хроматографии на силикагеле) и углеводородов – УВ (после колоночной хроматографии) определяли ИК-методом на спектрофотометре IRAffinity-1, Shimadzu (Япония) по полосе 2930 см^{-1} . В качестве стандарта использовали смесь (по объему): 37,5% изооктана, 37,5% гексадекана и 25% бензола (ГСО 7248-96, разработчик: АОЗТ «Экрос», РФ). Чувствительность метода – 3 мкг/мл экстракта [Немировская, 2013].

Состав алканов определяли методом газовой хроматографии на приборе «Кристалл-Люкс 4000-М» (РФ), с пламенно-ионизационным детектором, капиллярной колонкой $30\text{ м} \times 0,22\text{ мм}$ (фирма Supelco) с фазой: 5% фенила и 95% метилполисилоксана, при программировании температуры от 60 до 300°C , со скоростью $8^{\circ}/\text{мин}$, газ-носитель – гелий, скорость прохождения газа $1,5\text{ мл}/\text{мин}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение фильтрационной взвеси. В поверхностных водах на трансарктическом разрезе содержание взвеси закономерно увеличивалось в устьевых областях рек, где ее концентрации возрастали в 3–4 раза по сравнению с близлежащими станциями (с 0,41 до 1,85 мг/л, рис. 2). В проливе Вилькицкого в поверхностном горизонте концентрация взвеси во время исследования оставалась на одном уровне – 0,22–0,25 мг/л. Наиболее высокое содержание взвеси (до 5,9 мг/л) установлено в заливе Благополучия.

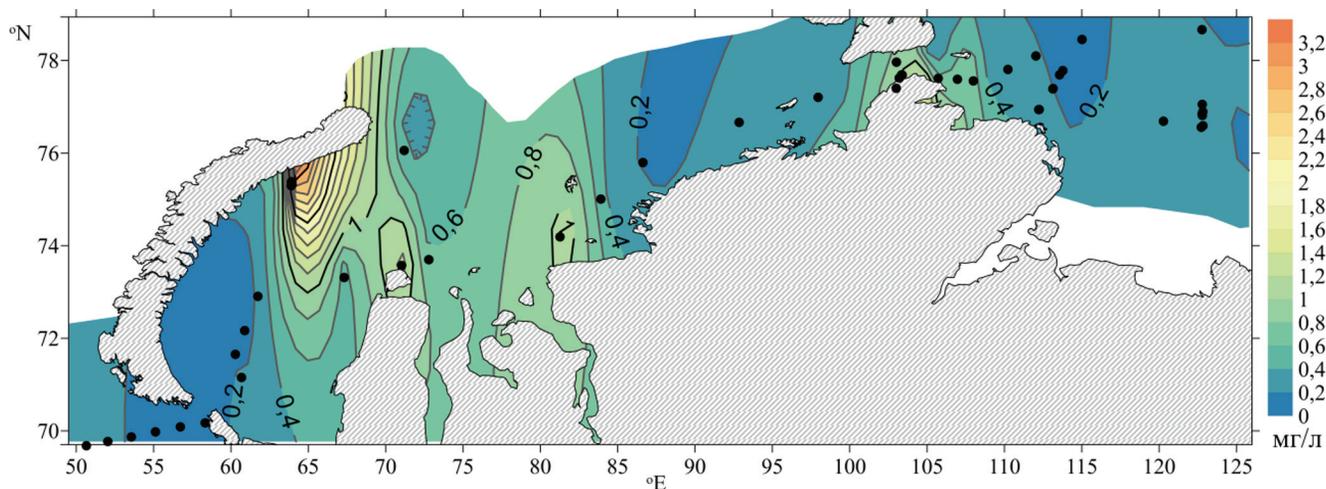


Рис. 2. Распределение взвеси (мг/л) в поверхностных водах

Fig. 2. Distribution of particulate matter (mg/l) in surface water

С глубиной содержание взвеси возрастало на большинстве станциях от поверхности к придонному горизонту, максимально в 36 раз на ст. 5943, находящейся в районе выносов р. Оби (с 0,6 до 21,8 мг/л). В проливе Вилькицкого содержание взвеси увеличивалось с глубиной в 32 раза (с 0,1 до 3,2 мг/л).

Необходимо отметить, что в глубоководной части Карского моря на ст. 5942 (рис. 3А) в слое термоклина распределение взвеси изменялось через 23 дня при снятии ловушки (с 0,3 до 0,5 мг/л), что

вероятно обусловлено изменением гидрологических условий. Напротив, на ст. 5946 на шельфовом склоне моря Лаптевых характер распределения взвеси не изменился через 8 дней после снятия ловушки (см. рис. 3Б).

Распределение концентраций УВ в поверхностных водах в общих чертах совпадало с содержанием взвеси, и между их концентрациями наблюдалась корреляция $r_{Вз-УВ} = 0,74$ ($n = 28, p < 0,05$). Однако рост концентраций УВ в барьерных зонах выражен в меньшей степени, чем для взвеси (табл.).

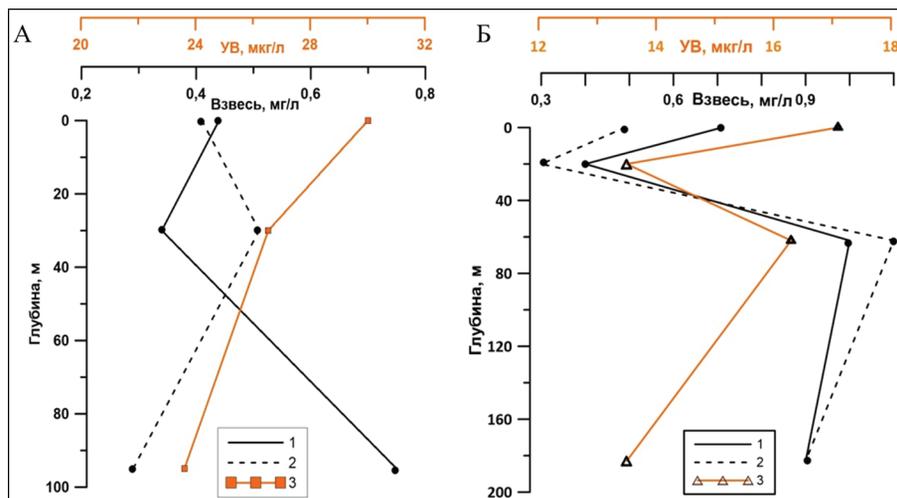


Рис. 3. Изменчивость концентраций фильтрационной взвеси (1, 2) и УВ (3) с глубиной в Карском море на ст. 5942 (А) и на шельфовом склоне моря Лаптевых на ст. 5946 (Б): 1 – до снятия ловушки; 2 – после снятия ловушки

Fig. 3. Vertical variability of amounts of filtrated suspended matter (1, 2) and UV (3) in the Kara Sea (st. 5942) (A) and at the shelf slope of the Laptev Sea (st. 5946) (B): 1 – before; 2 – after the removal of the sediment trap

Потоки взвешенного вещества. Ловушки были установлены в заливе Благополучия Новой Земли, Новоземельской впадине и в зоне выноса Оби в Карском море, а также на шельфе моря Лаптевых и в проливе Вилькицкого (рис. 4).

Величина потоков взвешенного вещества изменялась от 79 до 13127 мг/(м²сут), с максимумом в поверхностном горизонте Карского моря в заливе Благополучия (ст. 5981, см. рис. 4). Только в этом районе поверхностный поток в придонном горизонте был меньше, чем на поверхности (см. табл.).

В Новоземельском желобе на ст. 5942 максимум потока взвеси (342 мг/(м²сут)) наблюдался в промежуточном слое на глубине «жидкого дна» (50–60 м).

В проливе Вилькицкого (ст. 5944) поток взвешенного вещества достигал 1541 мг/(м²сут) у дна. На шельфе моря Лаптевых (ст. 5946) величины потоков взвеси оказались низкими – 79 мг/(м²сут) в поверхностном слое на горизонте 20 м, а у дна (55 м) – 343 мг/(м²сут). При этом на континентальном склоне (ст. 5945) поток взвеси даже на глубине

50 м был еще ниже – 104 мг/(м²сут), а в придонном слое достигал 1534 мг/м²сут.

В устье выноса Оби также наблюдался значительный рост величины потока взвеси с глубиной и в придонном горизонте увеличивался почти в 20 раз, по сравнению с поверхностным (до 6799 мг/(м²сут)). Согласно показанию СТД-зонда здесь также зафиксировано увеличение мутности [Экосистемы..., 2021].

Потоки $C_{опз}$. В Карском море самые высокие значения потока $C_{опз}$ наблюдались в зоне разгрузки речных вод (ст. 5943, см. рис. 4). На склоне Новоземельского желоба (ст. 5942), находящегося под влиянием адвекции атлантических вод, более холодных и насыщенных кислородом, которые задерживают процесс минерализации ОВ в водной толще, поток $C_{опз}$ изменялся в пределах 14–21 мгС/(м²сут).

Согласно гидрологическим данным [Флинт, 2019] поток вод направлен из Карского моря в море Лаптевых через пролив Вилькицкого. В верхнем 50-метровом слое теплых распресненных вод ма-

терикового генезиса, богатых биогенными элементами, поток $C_{\text{орг}}$ составил всего 10 мгС/(м²сут), что связано, по всей видимости, с абразией берегов. При этом поток $C_{\text{орг}}$ как и общий поток взвеси, максимален в придонном горизонте (23 и 1541 мгС/(м²сут) соответственно), где происходит взмучивание осадка из-за вдольсклоновых течений.

В море Лаптевых повышенный поток $C_{\text{орг}}$ приурочен к глубинному слою на склоне шельфа – 34 мгС/(м²сут) (ст. 5945), что может быть связано с адвекцией теплых и пресных вод из пролива Вилькицкого вдоль континентального склона, заглубляющихся до 150 м [Экосистемы..., 2021], а также тонкодисперсным составом осадков.

Вещественный состав взвешенного вещества.

В ходе исследований выделяется две основные группы веществ, которые составляют поток водной взвеси: литогенное вещество аллохтонного генезиса и биогенное автохтонного происхождения, представляющее собой остатки живых организмов и детрит [Лисицын, 2014]. Биогенное вещество, в свою очередь, складывается из органического взвешенного углерода, маркером которого является $C_{\text{орг}}$ аморфного кремнезема ($SiO_{2\text{аморф}}$) и карбоната кальция ($CaCO_3$).

В пробах верхних горизонтов доминируют в основном разрушенные клетки диатомовых и редкие целые клетки динофлагеллят, что подтверждают данные электронной микроскопии (рис. 5А, Б).

Таблица

Результаты исследования потоков взвеси и $C_{\text{орг}}$ в седиментационных ловушках

Номер станции	Дата установки	Дата подъема	Экспозиция, сутки	Глубина, м	Горизонт, м	Поток, мг/(м ² сут)		УВ, мкг/л
						Взвесь	$C_{\text{орг}}$	
5942	20.08.18	12.09.18	23	90	55	239	14	70
					65	342	21	37
					75	187	14	27
5943	21.08.18	07.09.18	17	30	10	345	14	35
					20	6799	682	34
5944	23.08.18	04.09.18	12	214	50	337	9	549
					100	567	10	582
					160	1541	23	54
5945	24.08.18	31.08.18	8	190	50	104	1	53
					100	1609	34	5
					160	1534	18	36
5946	25.08.18	31.08.18	7	65	20	79	0,5	68
					45	117	1	410
					55	343	8	307
5981	09.09.18	11.09.18	2	113	20	13127	196	631
					60	12135	171	–
					90	11900	145	–

В большинстве проб доминируют алюминий и кремний – маркеры литогенного вещества, с максимальной долей в заливе Благополучия (90%, см. рис. 5В, Г). Воды залива обеднены биогенными элементами и ОВ, так как поступают с потоками с Новой Земли с каменистыми почвами. Планктон присутствовал в незначительных количествах лишь в верхнем однородном слое, имеющем здесь толщину, согласно гидрофизическим данным, не более 10 м [Экосистемы..., 2021]. На больших глубинах количество планктона было минимальным, разрушенные клетки диатомовых водорослей встречались в незначительных количествах. По сравнению

с остальными пробами, где доля $C_{\text{орг}}$ достигала 30%, в заливе Благополучия содержание $C_{\text{орг}}$ снижалось до 10% за счет присутствия карбонатных минералов доломита и кальцита. Исследования проходили в осенний период с преобладанием деструкционных процессов (содержание кислорода около 90%) [Экосистемы..., 2021]. Поэтому концентрации взвешенных веществ даже по показателям биомассы фитопланктона здесь были в 2–3 раза ниже по сравнению с южной частью исследуемого района Карского моря. Установлено повышенное содержание железа в основном за счет присутствия в алюмосиликатах пирита.

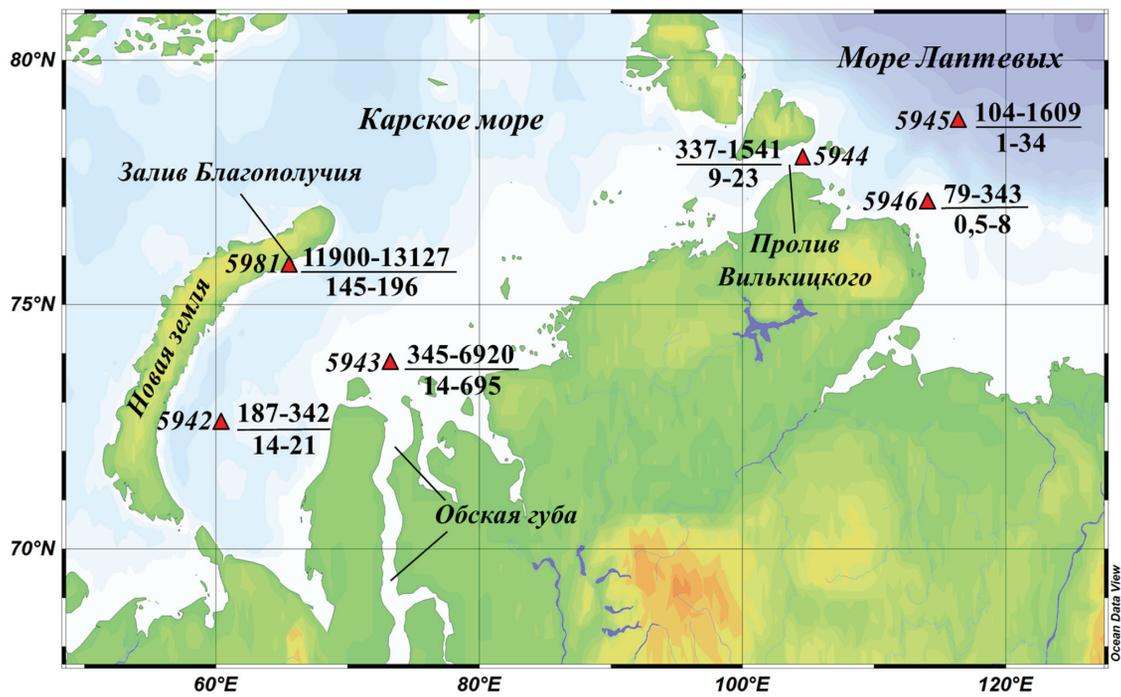


Рис. 4. Изменчивость потоков $\text{мг}/(\text{м}^2\text{сут})$ взвеси (числитель) и органического углерода (знаменатель), полученных с помощью седиментационных ловушек в морях Карском и Лаптевых (треугольниками обозначено местоположение, курсивом – номера станций)

Fig. 4. Variability of suspended matter (numerator) and organic carbon (denominator) fluxes ($\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{day}$) obtained by sediment traps in the Kara and the Laptev seas (triangles mark the location of the stations, station numbers are in italic)

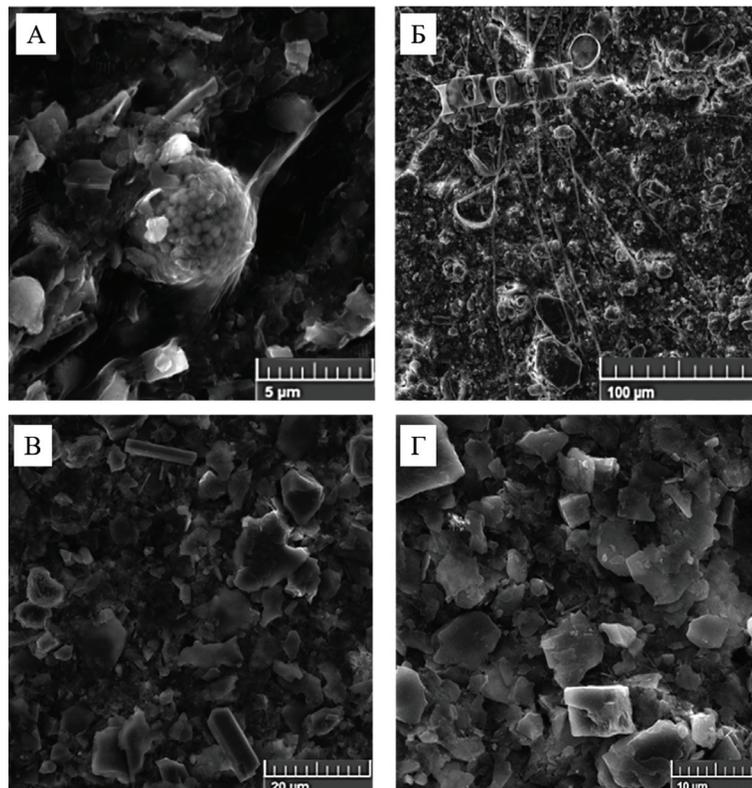


Рис. 5. Состав взвеси по данным электронного микроскопа на ст. 5945: А – горизонт 50 м, Б – горизонт 160 м; на ст. 5981: В – горизонт 20 м; Г – горизонт 90 м

Fig. 5. Composition of suspension according to electronic microscopy data at st. 5945: А – at 50 m; Б – at 160 m; st. 5981: В – at 20 m; Г – at 90 m

Повышенная доля аморфного кремнезема в общем потоке (более 20%) установлена на станциях, приуроченных к срединному шельфу и континентальному склону моря Лаптевых (рис. 6).

В кутовой части залива Благополучия во взвешенном веществе наблюдалась высокая доля содержания Si (до 27%), при том что доля аморфного кремнезема в них составляла не более 1%. Это позволяет заключить, что весь кремний на этой станции входит в состав глинистых сланцев и имеет терригенный генезис.

В ловушке на континентальном склоне (ст. 5945) на глубине ниже 100 м количество литогенного материала увеличивалось до 70% от общего потока взвеси (см. рис. 6Б). Специфические термохалинные характеристики промежуточного слоя (более высокая температура относительно поверхностных вод), согласно гидрофизическим данным [Флинт и др., 2018], свидетельствуют о консолидированном переносе вод присклоновыми течениями из других областей. Наличие этих течений приводит к взмучиванию осадочных масс континентального склона, что становится причиной увеличения потоков взвеси [Лисицын, 2014].

Поэтому в составе взвеси придонного горизонта встречались неокатанные частицы полевого шпата, плагиоклаза, апатита, коагулирующие на органических остатках. Обнаружен титан, находящийся как в алюмосиликатных минералах, так и в рутиле, и окислы железа.

В процессе седиментации изменялся состав УВ. На взморье Оби (ст. 5943) на глубине 10 м величина индекса нечетности – СРІ (Carbon Preference Index – отношение нечетных гомологов к четным) – составила всего 0,92, что типично для фильтрационной взвеси [Немировская, Флинт, 2022; Marti et al., 2001]. Но уже на глубине 20 м в высокомолекулярной области доминировали нечетные терригенные алканы, поступающие с нефеллоидной взвесью из донных осадков, и значение СРІ возрастало до 1,75. Близкое распределение гомологов наблюдалось также во взвеси седиментационной ловушки, поставленной в проливе Вилькицкого (ст. 5944). Здесь на глубине 50 м происходило плавное распределение гомологов, а на глубине 160 м в высокомолекулярной области доминировала серия нечетных алканов C_{27} – C_{35} .

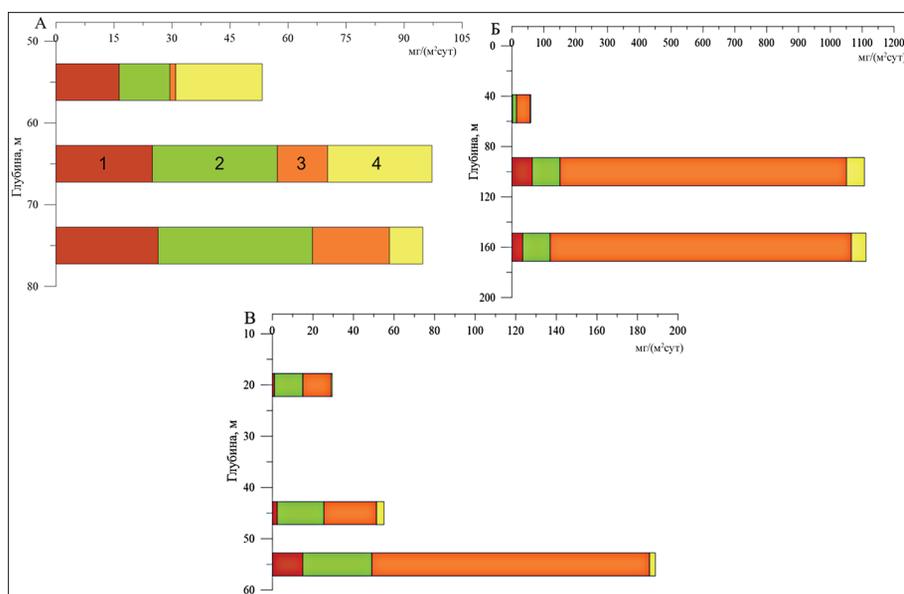


Рис. 6. Вещественный состав взвешенного вещества седиментационных ловушек на ст. 5942 (А), 5945 (Б) и 5946 (В): 1 – органическое вещество; 2 – аморфный кремнезем; 3 – литогенное вещество; 4 – карбонат кальция

Fig. 6. Material composition of suspended matter from the sediment traps at st. 5942 (A), st. 5945 (B) and st. 5946 (B): 1 – organic matter; 2 – amorphous silica; 3 – lithogenic matter; 4 – calcium carbonate

Показателен в этом плане также состав УВ в жемчужине Св. Анны, где была поставлена годовая ловушка с сентября 2018 по июнь 2019 г. Среди алканов доминировали высокомолекулярные гомологи (рис. 7), и их отношение легких к высокомолекулярным ($L/H = \sum(C_{9-24})/\sum(C_{25-35})$) изменялось от 0,45 до 0,87. При

этом в низкомолекулярной области доминировал алкан фитопланктона $n-C_{17}$, как за все время исследования (с октября по май, см. рис. 7А), так и на разных горизонтах (см. рис. 7Б). Количество низкомолекулярных алканов уменьшалось со временем экспозиции, и в октябре 2018 г. их было больше (45%) по

сравнению с маем 2019 г. (34%). С глубиной также происходило увеличение высокомолекулярных гомологов от суммы – с 55 (70 м) до 70% (110 м), так же как и величины СРІ – от 1,4 до 1,7.

Морская взвесь формируется в результате жизнедеятельности планктонных организмов (биогенное вещество) и поступления минерального материала (абиогенное вещество). Изучение ее состава необходимо для понимания процессов современной седиментации и путей переноса загрязняющих веществ. Факторы среды (температура и соленость, значительный речной сток, ледовая разгрузка речных льдов и морских айсбергов, береговая абразия и адвекция атлантических вод) формируют соотношение величин составляющих потока.

Во время наших исследований поступление осадочного материала наблюдалось наиболее интенсивно в прибрежной зоне. Это связано с тем, что на концентрацию и состав взвеси влияет береговая абразия и разгрузка ледников при освобождении заключенных в них осадочных материалов, поступающих с суши и из атмосферы. Самые продолжительные световые дни увеличивают активность

биоты, и повышается доля биогенной взвеси в общем потоке [Новигатский и др., 2020].

В связи с тем, что исследования проводили в межень, когда биогенные процессы уменьшаются, наблюдалось высокое содержание терригенной взвеси на протяжении всего периода. Подобная картина типична для всех арктических морей: Белого, Баренцева и Восточно-Сибирского [Система..., 2013; Лисицын, 2010; Матишов и др., 2000]. Так, по данным [Fahl, Nöthig, 2007], в Центральной Арктике в аналогичный период исследований были зафиксированы потоки взвеси 150–200 мг/(м²сут) по всей толще вод, а величина потоков $C_{\text{орг}}$ при этом изменялась в пределах 10–20 мгС/(м²сут), что соотносится с полученными нами результатами. Аморфный кремнезем $\text{SiO}_{2\text{аморф}}$ и карбонат кальция CaCO_3 входят в состав скелета фитопланктона, а потому их концентрации в общем потоке взвеси зависят от количества клеток, биомассы и видового состава фитопланктонного комплекса. Основным источником $\text{SiO}_{2\text{аморф}}$ в арктических шельфовых морях становятся диатомовые водоросли (род *Skeletonema* и *Chaetoceros*) и в меньшей степени – динофлагелляты (род *Prorocentrum*, *Ceratium* и *Dynophysis*) [Матишов и др., 2000].

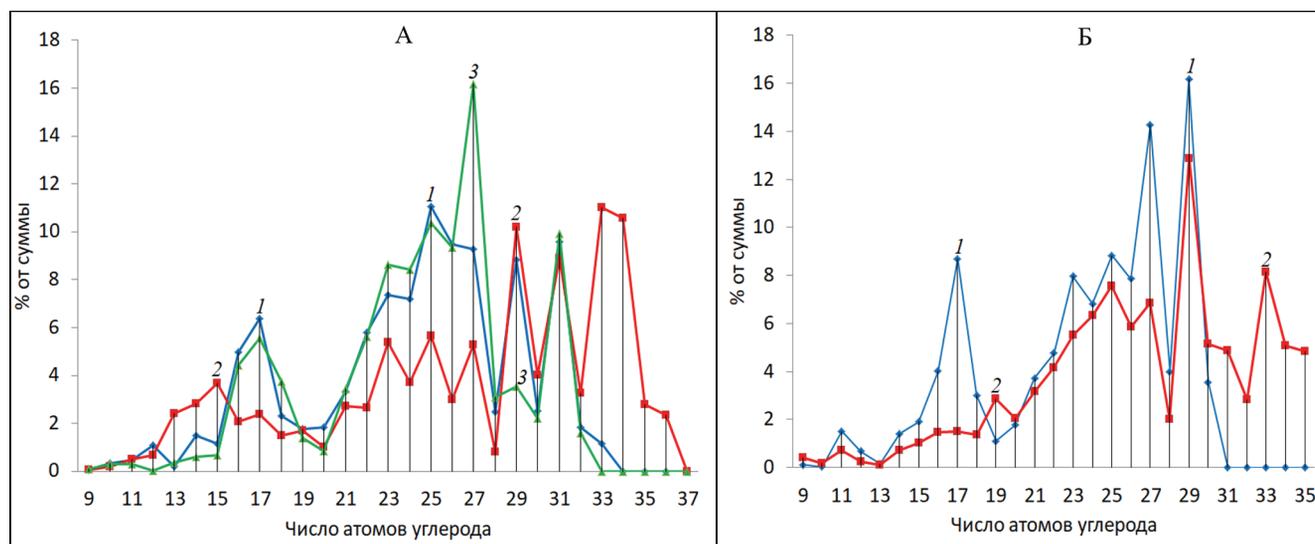


Рис. 7. Распределение алканов в годовой ловушке (желоб Св. Анны) по данным: А – в разные месяцы: 1 – октябрь 2018 г.; 2 – март 2019 г.; 3 – май 2019 г.; Б – для разных слоев: 1 – 60 м; 2 – 100 м

Fig. 7. Distribution of alkanes in a year-long trap (the St. Anne trench): А – for different months: 1 – October 2018; 2 – March 2019; 3 – May 2019; Б – for different layers: 1 – at 60 m; 2 – at 100 m

Также стоит отметить влияние циркумконтинентальной зональности в распределении взвеси, т. е. повышенные концентрации в шельфовой зоне, а также в устьевых областях рек. Поэтому содержание в поверхностных водах в зоне выноса Оби (1,85 мг/л) и величины потоков (6799 мг/(м²сут)) в

20 раз превышали потоки глубоководных районов (ст. 5943 и 5946, см. табл. 1), что характерно для зоны маргинального фильтра [Лисицын, 1994].

Наиболее интенсивный процесс осаднения наблюдался в заливе Благополучия – более 13000 мг/(м²сут), который располагался здесь на глубине выше 10 м.

При этом во взвеси преобладает литогенная составляющая по всей водной толще. В заливе оседает мелкодисперсный терригенный материал, поступающий с эоловым переносом с Новой Земли и в результате формирующий максимум взвеси в поверхностном горизонте. Вклад в потоки морской взвеси также вносит небольшой сток, возникающий при таянии ледника Налли, который выносит в залив взвешенное вещество, аккумулирующееся на его поверхности (до 5,92 мг/л).

По данным [Politova et al., 2012], на севере арх. Новая Земля потоки взвеси достигали 7760 мг/(м²сут) в придонном горизонте, а в их составе также, как и в заливе Благополучия, преобладала минеральная составляющая, обусловленная поступлением обломочного материала с берега.

Согласно исследованиям взвешенного вещества Карского моря с использованием седиментационных ловушек во второй половине сентября 1993 г., поток взвеси в области маргинального фильтра р. Оби составил 1321 мг/(м²сут) на глубине 22 м. При этом по результатам, полученным нами в августе 2018 г., на глубине 20 м в этой же зоне поток достигал 6799 мг/(м²сут). Это свидетельствует об изменчивости материкового стока р. Оби за последние два десятилетия, что подтверждают исследования [Магрицкий и др., 2019]. Начиная с середины 1990-х гг., наблюдалось увлажнение бассейна нижней Оби и прирост величины годового стока, что происходит из-за климатических изменений и увеличения антропогенной нагрузки на водные ресурсы.

По результатам, описанным в [Gaye et al., 2007], в глубоководной части Карского моря в течение года (2000–2001) потоки взвеси на горизонте 73 м изменялись в пределах 80–1320 мг/(м²сут), а поток $C_{\text{орг}}$ – 4,2–7,7 мгС/(м²сут). Согласно нашим измерениям в летне-осенний период, в данном районе величина потока составляла 187 мг/(м²сут), а $C_{\text{орг}}$ – 14 мгС/(м²сут).

В проливе Вилькицкого рост концентрации взвеси в поверхностном горизонте, скорее всего, обусловлен береговой абразией. Придонный максимум (до 1541 мг/(м²сут)) может быть связан с придонным противотечением, приводящим к увеличению потока взвеси у дна [Флинт и др., 2018].

В море Лаптевых на ст. 5945, наиболее удаленной от берега (см. рис. 4), нами установлены минимальные потоки (см. табл. 1). Однако в устьевой области Лены в сентябре 2015 г. в подповерхностном 20-метровом слое величина потоков взвеси изменялась от 1863 до 19 000 мг/(м²сут), а величина $C_{\text{орг}}$ составляла 142–464 мгС/(м²сут) [Дриц, 2017]. В 2018 г. на вершине континентального склона моря Лаптевых и у его подножья отмечались более низкие потоки взвеси и $C_{\text{орг}}$: 79–1609 и 0,5–8 мгС/(м²сут) соответ-

ственно. Аналогичные зависимости были установлены и в Белом море, где в центральной глубоководной части потоки взвеси в позднелетний период изменялись в пределах 100–500 мг/(м²сут), а вблизи берегов и устьевых областей их величины превышали 2000 мг/(м²сут) [Новигатский и др., 2020].

Воды Карского и моря Лаптевых относятся к ультраолиготрофным морям с первичной продукцией < 50 мгС/(м²сут) [Кособокова и др., 2012; Флинт и др., 2018]. Период исследования приходится на стадию сезонной сукцессии фитопланктонного комплекса, а ухудшение световых условий становится причиной повышения плотности планктонных клеток в верхнем 20-метровом слое. Средняя величина потоков взвеси в Карском море была выше, чем в море Лаптевых, не только из-за меньшей его продуктивности, но и из-за меньшего количества взвешенного вещества, приносимого реками [Добровольский, Залогин, 1965].

В глубинных горизонтах при массовом распаде пеллет и поступления взвеси из нефелоидных слоев, увеличивается количество высокомолекулярных нечетных алканов (рис. 7), наиболее стойких к разложению [Немировская, 2021; Yunker et al., 2015]. Отсутствие во взвеси частиц золы может свидетельствовать о незначительном вкладе антропогенных источников.

ВЫВОДЫ

В поверхностных водах распределение взвеси в значительной степени обусловлено влиянием рек и береговой абразией, а также эоловыми потоками с Новой Земли, где ее содержание достигало 5,92 мг/л.

Содержание УВ в поверхностных водах зависит от концентрации взвеси, так как между этими величинами наблюдается корреляция ($r = 0,74$). Увеличение концентраций УВ в барьерных зонах (>30 мкг/л) происходит в меньшей степени, чем взвеси. В большинстве изученных районов содержание УВ соответствует фоновым величинам и не превышает 20 мкг/л. Меньшая продуктивность моря Лаптевых, по сравнению с Карским, обуславливает более низкие концентрации УВ. Из-за минерального характера взвеси минимальные концентрации УВ (8–10 мкг/л) установлены в заливе Благополучия о. Новая Земля.

Согласно данным, полученным с помощью седиментационных ловушек, встречались в основном два типа распределения потоков по глубине: увеличение концентраций взвешенных веществ от поверхности с максимумом у дна, и уменьшение от поверхности до максимума в промежуточном слое. Различия обусловлены изменчивостью эоловых потоков, речными выносами и стратификацией вод. Наиболее интенсивный процесс осаждения про-

исходит в заливе Благополучия Новой Земли в поверхностном слое и в зоне выноса р. Оби (13127 и 6799 мг/(м²сут) соответственно).

В составе взвесей из седиментационных ловушек преобладали алюмосиликаты. Биогенная составляющая приурочена к поверхностным го-

ризонтам и представлена клетками в основном диатомовых водорослей. С глубиной доля биогенной компоненты уменьшается из-за разрушения клеток фитопланктона и снижения общей биологической активности ниже слоя пикноклина, что отражается также на составе УВ.

Благодарности. Работы проводились в рамках государственного задания (тема № FMWE-2021-0006), геохимические исследования – при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-17-00234-П), обобщение материалов в рамках гранта РФФИ 20-35-90025.

Авторы выражают благодарность А.В. Булохову и Г.В. Малофееву за постановку и подъем седиментационных ловушек, А.Г. Боеву, А.В. Золотых и А.В. Храмцовой за помощь в анализе проб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буренков В.И., Гольдин Ю.А., Кравчишина М.Д. Распределение концентрации взвеси в Карском море в сентябре 2007 г. по судовым и спутниковым данным // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 842–849.
- Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 2001. 376 с.
- Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР: природа, хозяйство. М.: Мысль, 1965. 350 с.
- Дриц А.В., Кравчишина М.Д., Пастернак А.Ф. и др. Роль зоопланктона в вертикальном потоке вещества в Карском море и море Лаптевых в осенний сезон // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 6. С. 934–948.
- Клювиткин А.А., Новигатский А.Н., Политова Н.В., Колтовская Е.В. Исследования потоков осадочного вещества на многолетнем трансокеаническом разрезе в зоне взаимодействия Северной Атлантики и Арктики // *Океанология*. 2019. Т. 59. № 3. С. 454–465.
- Клювиткин А.А., Кравчишина М.Д., Боев А.Г. Потоки осадочного вещества на гидротермальных полях южной части хребта Мона // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2021. Т. 497. № 1. С. 16–22.
- Косообокова К.Н., Перцова Н.М. Зоопланктон Белого моря: структура, динамика и экология // *Система Белого моря: водная толща и взаимодействующая атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера*. 2012. Т. 2. С. 640–674.
- Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
- Лисицын А.П. Новый тип седиментогенеза в Арктике – ледовый морской, новые подходы к исследованию процессов // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 1. С. 18–60.
- Лисицын А.П. Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли // *Мировой океан*. 2014. Т. 2. С. 331–571.
- Лисицын А.П., Новигатский А.Н., Шевченко В.П., Клювиткин А.А., Кравчишина М.Д., Филиппов А.С., Политова Н.В. Рассеянные формы осадочного вещества и их потоки в океанах и морях на примере Белого моря (результаты 12 лет исследований) // *Доклады Академии наук*. 2014. Т. 456. № 3. С. 355–355.
- Лисицын А.П., Лукашин В.Н., Дара О.М. Минеральный состав и потоки минералов во взвеси из толщи вод Каспийского моря // *Доклады Академии наук*. 2015. Т. 463. № 2. С. 221–221.
- Лукашин В.Н., Клювиткин А.А., Лисицын А.П., Новигатский А.Н. Малая седиментационная ловушка МСЛ-110 // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 4. С. 746–750.
- Луяцарев С.В. Определение органического углерода в морских донных отложениях методом сухого сжигания // *Океанология*. 1986. Т. 26. № 4. С. 704–708.
- Магрицкий Д.В., Чалов С.Р., Агафонова С.А., Кузнецов М.А., Банщикова Л.С. Гидрологический режим нижней Оби в современных гидроклиматических условиях и под влиянием крупномасштабной водохозяйственной деятельности // *Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа*. 2019. № 1. С. 106–115.
- Матишов Г., Макаревич П., Тимофеев С., Кузнецов Л., Дружков Н., Ларионов В., Баранова О., Голубев В., Зуев А., Адров Н., Денисов В., Ильин Г., Кузнецов А., Денисенко С., Савинов В., Шавыкин А., Смоляр И., Левитус С., О'Брайан Т. Биологический атлас морей Арктики 2000: планктон Баренцева и Карского морей // *НОАА Атлас НЕСДИС*. 2000. Т. 39. 270 с.
- Немировская И.А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М.: Научный мир, 2013. 343 с.
- Немировская И.А., Полякова А.В., Юхимук В.Д. Особенности распределения и состава углеводородов в прибрежных районах Черного моря // *Вестн. МГУ. Сер. 5. Геогр.* 2013. № 6. С. 16–22.
- Немировская И.А. Распределение и происхождение углеводородов на трансарктическом разрезе через моря Сибири // *Океанология*. 2021. Т. 61. № 2. С. 209–219.
- Немировская И.А., Храмцова А.В., Халиков И.С., Колтовская Е.В., Соломатина А.С. Углеводороды в воде и осадках Норвежского и Баренцева морей // *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. 2021. № 4. С. 94–107.
- Немировская И.А., Флинт М.В. Особенности поведения органических соединений в воде и донных осадках в Карском море во время схода сезонного льда // *Океанология*. 2022. Т. 62. № 1. С. 64–74.
- Новигатский А.Н., Клювиткин А.А., Лисицын А.П. Скорости осадконакопления, вертикальные потоки вещества и абсолютные массы осадков в шельфовой области Российской Арктики // *Океанологические исследования*. 2018. Т. 46. № 2. С. 167–179.
- Новигатский А.Н., Лисицын А.П., Шевченко В.П., Клювиткин А.А., Кравчишина М.Д., Политова Н.В. Седиментогенез в Белом море: вертикальные потоки

- рассеянного осадочного вещества и абсолютные массы донных осадков // *Океанология*. 2020. Т. 60. № 3. С. 429–441.
- Новигатский А.Н., Лисицын А.П., Шевченко В.П., Кловиткин А.А., Кравчишина М.Д., Политова Н.В. Вертикальные потоки вещества в Северном Ледовитом океане // Система Баренцева моря / под ред. А.П. Лисицына. М.: Научный мир, 2021. С. 278–286.
- Система Белого моря. Т. III: Рассеянный осадочный материал гидросферы, микробные процессы и загрязнения / под ред. А.П. Лисицына. М.: Научный мир, 2013. 668 с.
- Флинт М.В. Морские экосистемы Сибирской Арктики. 72-й научный рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» (16 августа – 20 сентября 2018 г.) // Итоги экспедиционных исследований в 2018 году в Мировом океане, внутренних водах и на архипелаге Шпицберген. 2019. С. 182–184.
- Флинт М.В., Поляков С.Г., Римский-Корсаков Н.А. Экосистемы морей Сибирской Арктики-2017 (69-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш») // *Океанология*. 2018. Т. 58. № 2. С. 331–333.
- Экосистемы Карского моря и моря Лаптевых. Экспедиционные исследования 2016 и 2018 гг. М.: Издатель И.М. Ерхова, 2021. 368 с.
- Эркин Т. Сотрудничество в Арктике – необходимость // *Арктические ведомости*. 2012. № 3. С.18–27.
- AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme), *Sources, Inputs and Concentrations of Petroleum Hydrocarbons, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and other Contaminants Related to Oil and Gas Activities in the Arctic*, Chapter 4, Oslo, Norway, 2007, 87 p.
- Antia A.N., Koeve W., Fischer G., Blanz V., Schulz Bull D., Schölten J., Zeitzschel B. Basin-wide particulate carbon flux in the Atlantic Ocean: Regional export patterns and potential for atmospheric CO₂ sequestration, *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, vol. 15, no. 4, p. 845–862.
- Collins J.R., Edwards B.R., Thamatrakoln K., Ossolinski J.E., DiTullio G.R., Bidle K.D., Mooy van B.A. The multiple fates of sinking particles in the North Atlantic Ocean, *Global Biogeochemical Cycles*, 2015, vol. 29, no. 9, p. 1471–1494.
- Fahl K., Nöthig E.M. Lithogenic and biogenic particle fluxes on the Lomonosov Ridge (central Arctic Ocean) and their relevance for sediment accumulation: Vertical vs. lateral transport, *Deep Sea Research, part I, Oceanographic Research Papers*, 2007, vol. 54, no. 8, p. 1256–1272.
- Gardner W.D. Sediment trap sampling in surface waters, Cambridge University Press, Cambridge, 2000, p. 240–284.
- Gaye B., Fahl K., Kodina L.A., Lahajnar N., Nagel B., Unger D., Gebhardt A.C. Particulate matter fluxes in the southern and central Kara Sea compared to sediments: Bulk fluxes, amino acids, stable carbon and nitrogen isotopes, sterols and fatty acids, *Continental Shelf Res.*, 2007, vol. 27, no. 20, p. 2570–2594.
- Jonkers L., Brummer G.J.A., Peeters F.J., Aken van H.M., De Jong M.F. Seasonal stratification, shell flux, and oxygen isotope dynamics of left-coiling *N. pachyderma* and *V. quinqueloba* in the western subpolar North Atlantic, *Paleoceanography*, 2010, vol. 25, no. 2, p. 1–13.
- Lampitt R.S., Antia A.N. Particle flux in deep seas: regional characteristics and temporal variability, *Deep Sea Research, part I, Oceanographic Research Papers*, 1997, vol. 44, no. 8, p. 1377–1403.
- Magen C., Chaillou G., Crowe S.A., Mucci A., Sundby B., Gao A., Sasaki H. Origin and fate of particulate organic matter in the southern Beaufort Sea – Amundsen Gulf region, Canadian Arctic, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, vol. 86, no. 1, p. 31–41.
- Marti S., Bayona J., Mejanelle L., Saliot A., Albaiges J. Biogeochemical Evolution of the Outflow of the Mediterranean Deep-Lying Particulate Organic Matter into the Northeastern Atlantic, *Marine Chemistry*, 2001, vol. 76, p. 211–231, DOI: 10.1016/S0304-4203(01)00064-0.
- Politova N.V., Shevchenko V.P., Zernova V.V. Distribution, composition, and vertical fluxes of particulate matter in bays of Novaya Zemlya Archipelago, Vaigach Island at the end of summer, *Advances in Meteorology*, 2012, vol. 2012, Article ID 259316, 15 p., DOI: 10.1155/2012/259316.
- Yunker M.B., Macdonald R.W., Ross P.S. et al. Alkane and PAH provenance and potential bioavailability in coastal marine sediments subject to a gradient of anthropogenic sources in British Columbia, Canada, *Org. Geochem.*, 2015, vol. 89–90, p. 80–116.

Поступила в редакцию 15.04.2021

После доработки 16.04.2022

Принята к публикации 27.06.2022

DISTRIBUTION OF SUSPENDED MATTER AND HYDROCARBONS IN THE KARA AND THE LAPTEV SEAS IN AUGUST – SEPTEMBER 2018

E.V. Koltovskaya¹, I.A. Nemirovskaya²

^{1,2} P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Analytical laboratory

¹ Junior Scientific Researcher; e-mail: koltovskaya.ev@ocean.ru

² Chief Scientific Researcher; D.Sc. in Geology and Mineralogy; e-mail: nemir44@mail.ru

Distribution of suspended matter and the volumes of its flows in the Kara and Laptev seas was studied during the Cruise 72 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh (August–September 2018) using the filtration technique and the sediment traps, respectively. The organic component (C_{org}, lipids and hydrocarbons) and the

inorganic lithogenic component (amorphous silica and calcium carbonate) were determined for the suspension. It was found that the content of suspended matter in surface waters varied from 0,2 to 5,9 mg/l (on average 0,90 mg/l) with maximum values in the Blagopoluchiya Bay, of lipids from 28 to 120 µg/l (average 52 µg/l), and of aliphatic hydrocarbons from 10 to 49 µg/l (average 22 µg/l) with maximum in the area of the Ob River discharge (6799 mg/m²day). The suspension flux decreased from the surface to the near-bottom horizon only in the Blagopoluchiya Bay (from 13 127 to 11 900 mg/m²day), but in most samples the flux increased in the near-bottom horizon. The maximum flux in the Ob River discharge water area coincides with the maximum of the C_{org} flux (682 mg/m²day). The allochthonous components basically prevailed over autochthonous ones in the composition of suspended matter, as well as in organic compounds, including hydrocarbons.

Keywords: suspended matter, organic matter, petroleum hydrocarbons, sedimentation, the Kara Sea, the Laptev Sea, low-water period

Acknowledgements. The study was carried out under the state task (theme FMWE-2021-0006); geochemical surveys were financially supported by the Russian Science Foundation (project 19-17-00234-P); integration of materials was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 20-35-90025).

The authors are grateful to A.V. Bulokhov and G.V. Malofeev for installation and rising of sediment traps and to A.G. Boev, A.V. Zolotykh and A.V. Khramtsova for their assistance in sample analyzing.

REFERENCES

- AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme), Chapter 4, Sources, Inputs and Concentrations of Petroleum Hydrocarbons, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and other Contaminants Related to Oil and Gas Activities in the Arctic, Oslo, Norway, 2007, p. 87.
- Antia A.N., Koeve W., Fischer G., Blanz V., Schulz B.D., Schölten J., Zeitzschel B. Basin-wide particulate carbon flux in the Atlantic Ocean: Regional export patterns and potential for atmospheric CO₂ sequestration, *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, vol. 15, no. 4, p. 845–862.
- Burenkov V.I., Gol'din Yu.A., Kravchishina M.D. Raspre-delenie kontsentratsii vzvesi v Karskom more v sentyabre 2007 g. po sudovym i sputnikovym dannym [Distribution of suspension in the Kara Sea in September 2007 according to ship observations and remote sensing data], *Okeanologiya*, 2010, vol. 50, no. 5, p. 842–849. (In Russian)
- Collins J.R., Edwards B.R., Thamatrakoln K., Ossolin-ski J.E., DiTullio G.R., Bidle K.D., Mooy van B.A. The multiple fates of sinking particles in the North Atlantic Ocean, *Global Biogeochemical Cycles*, 2015, T. 29, no. 9, p. 1471–1494.
- Dobrovolskii A.D., Zalogin B.S. *Morya SSSR: priroda, khozyaistvo* [Seas of the USSR: nature and economy], Moscow, Mysl', 1965, 350 p. (In Russian)
- Drits A.V., Kravchishina M.D., Pasternak A.F. Rol' zooplanktona v vertikal'nom potoke veshchestva v Karskom more i more Laptevykh v osennii sezon [Role of zooplankton in the vertical material flow in the Kara and Laptev seas during the autumn], *Okeanologiya*, 2017, vol. 57, no. 6, p. 934–948. (In Russian)
- Ekosistemy Karskogo morya i morya Laptevykh. Ekspedit-sionnye issledovaniya 2016 i 2018 gg. [Ecosystems of the Kara and the Laptev seas. 2016 and 2018 expeditions], IO, Moscow, izdatel' I.M. Erkhova, 2021, 368 p. (In Russian)
- Erkki V. Sotrudnichestvo v Arktike – neobkhodimost' [Col-laboration in the Arctic is a necessity], *Arkticheskie ve-domosti (Informatsionno-analiticheskii zhurnal)*, 2012, no. 3, p. 18–27. (In Russian)
- Fahl K., Nöthig E.M. Lithogenic and biogenic particle fluxes on the Lomonosov Ridge (central Arctic Ocean) and their relevance for sediment accumulation: Vertical vs. lateral transport, *Deep Sea Research, part I, Oceanographic Research Papers*, 2007, vol. 54, no. 8, p. 1256–1272.
- Flint M.V. [Marine ecosystems of the Siberian Arctic. The Cruise 72 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh (16 August – 20 September 2018)], *Itogi ekspeditsionnykh issledovaniy v 2018 godu v Mirovom okeane, vnutrennikh vodakh i na arhipelage Shpitsbergen* [Results of 2018 expeditions in the World Ocean, inner waters and the Svalbard Archipelago], 2019, p. 182–184. (In Russian)
- Flint M.V., Poyarkov S.G., Rimskii-Korsakov N.A. Ekosis-temy morei sibirskoi Arktiki-2017 (69-i reis nauchno-issledovatel'skogo sudna "Akademik Mstislav Keldysh") [Ecosystems of the seas of the Siberian Arctic-2017 (the Cruise 69 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh)], *Okeanologiya*, 2018, vol. 58, no. 2, p. 331–333. (In Russian)
- Gardner W.D. *Sediment trap sampling in surface waters*, Cambridge University Press, Cambridge, 2000, p. 240–284.
- Gaye B., Fahl K., Kodina L.A., Lahajnar N., Nagel B., Un-ger D., Gebhardt A.C. Particulate matter fluxes in the southern and central Kara Sea compared to sediments: Bulk fluxes, amino acids, stable carbon and nitrogen iso-topes, sterols and fatty acids, *Continental Shelf Res*, 2007, vol. 27, no. 20, p. 2570–2594.
- Jonkers L., Brummer G.J.A., Peeters F.J., Aken van H.M., De Jong M.F. Seasonal stratification, shell flux, and oxy-gen isotope dynamics of left-coiling *N. pachyderma* and *V. quinqueloba* in the western subpolar North Atlantic, *Paleoceanography*, 2010, vol. 25, no. 2.
- Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Boev A.G. Potoki osadochnogo veshchestva na gidrotermal'nykh polyakh yuzhnoi chasti khrebita Mona [Sediment matter flows within hydrothermal fields in the southern part of the Mona Ridge], *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle*, 2021, vol. 497, no. 1, p. 16–22. (In Russian)
- Klyuvitkin A.A., Novigatskii A.N., Politova N.V., Koltovskaya E.V. Issledovaniya potokov osadochnogo veshchestva na mnogoletnem transokeanicheskom razreze v zone vzaim-odeistviya Severnoi Atlantiki i Arktiki [Investigation of sedi-ment matter flows at the multiyear trans-ocean section in the zone of North Atlantic-Arctic interaction], *Okeanologiya*, 2019, vol. 59, no. 3, p. 454–465. (In Russian)
- Kosobokova K.N., Pertsova N.M. [Zooplankton of the White Sea: structure, dynamics and ecology], *Sistema Belogo morya: vodnaya tolshcha i vzaimodeistviyushchaya at-mosfera, kriosfera, rechnoi stok i biosfera* [The White

- Sea system: water column and interactions with atmosphere, cryosphere, river runoff and biosphere], 2012, vol. 2, p. 640–674. (In Russian)
- Lampitt R.S., Antia A.N. Particle flux in deep seas: regional characteristics and temporal variability, Deep Sea Research, part I, *Oceanographic Research Papers*, 1997, vol. 44, no. 8, p. 1377–1403.
- Lisitsyn A.P. Marginal'nyi fil'tr okeanov [Marginal filter of the oceans], *Okeanologiya*, 1994, vol. 34, no. 5, p. 735–747. (In Russian)
- Lisitsyn A.P. Novyi tip sedimentogeneza v Arktike-ledovyi morskoi, novye podkhody k issledovaniyu protsessov [New type of sediment generation in the Arctic – glacial-marine, new approaches to the investigation of processes], *Geologiya i geofizika*, 2010, vol. 51, no. 1, p. 18–60. (In Russian)
- Lisitsyn A.P. Sovremennye predstavleniya ob osadkoobrazovanii v okeanakh i moryakh. Okean kak prirodnyi samopisets vzaimodeistviya geosfer Zemli [Modern concepts of sediment generation in oceans and seas. Ocean as a natural recorder of interactions between the Earth's geospheres], *Mirovoi ocean*, 2014, vol. 2, p. 331–571. (In Russian)
- Lisitsyn A.P., Lukashin V.N., Dara O.M. Mineral'nyi sostav i potoki mineralov vo vzvesi iz tolshchi vod Kaspiiskogo moray [Mineral composition and mineral fluxes in suspension from the water column of the Caspian Sea], *Doklady Akademii nauk*, 2015, vol. 463, no. 2, p. 221–221. (In Russian)
- Lisitsyn A.P., Novigatskii A.N., Shevchenko V.P., Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Filippov A.S., Politova N.V. Rasseyannye formy osadochnogo veshchestva i ikh potoki v okeanakh i moryakh na primere Belogo morya (rezul'taty 12 let issledovaniy) [Dispersed forms of sediment matter and their flows in oceans and seas (case study of the White Sea, results of 12 years of investigations)], *Doklady Akademii nauk*, 2014, vol. 456, no. 3, p. 355–355. (In Russian)
- Lisitsyn A.P., Shevchenko V.P., Vinogradov M.E., Severina O.V., Vavilova V.V., Mitskevich I.N. Particle fluxes in the Kara Sea and Ob and Yenisey estuaries, *Oceanology*, 1995, vol. 34, no. 5, p. 683–693.
- Lukashin V.N., Klyuvitkin A.A., Lisitsyn A.P., Novigatskii A.N. Malaya sedimentatsionnaya lovushka MSL-110 [Small sediment trap MSL-110], *Okeanologiya*, 2011, vol. 51, no. 4, p. 746–750. (In Russian)
- Lukashin V.N., Ivanov G.V., Pol'kin V.V., Gurvich E.G. O geokhimii aerorozlei v tropicheskoi Atlantike (po rezul'tatam 35-go reisa NIS "Akademik Keldysh") [On the geochemistry of aerosols in the tropical part of the Atlantic Ocean (according to the results of the Cruise 35 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh)], *Geokhimiya*, 1996, no. 10, p. 985–994. (In Russian)
- Lyutsarev S.V. Opredelenie organicheskogo ugleroda v morskikh donnykh otlozheniyakh metodom sukhogo sozhzheniya [Determination of organic carbon in marine bottom sediments by the dry burning method], *Okeanologiya*, 1986, vol. 26, no. 4, p. 704–708. (In Russian)
- Magen C., Chailou G., Crowe S.A., Mucci A., Sundby B., Gao A., Sasaki H. Origin and fate of particulate organic matter in the southern Beaufort Sea – Amundsen Gulf region, Canadian Arctic, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, vol. 86, no. 1, p. 31–41.
- Magritskii D.V., Chalov S.R., Agafonova S.A., Kuznetsov M.A., Banshchikova L.S. Gidrologicheskii rezhim nizhnei Obi v sovremennykh gidroklimaticheskikh usloviyakh i pod vliyaniem krupnomasshtabnoi vodokhozyaistvennoi deyatelnosti [Hydrological regime of the Lower Ob River under present-day hydro-climate situation and the large-scale hydroeconomic activities], *Nauchnyi vestnik Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga*, 2019, no. 1, p. 106–115. (In Russian)
- Marti S., Bayona J., Mejanelle L., Saliot A., Albaiges J. Biogeochemical Evolution of the Outflow of the Mediterranean Deep-Lying Particulate Organic Matter into the Northeastern Atlantic, *Marine Chemistry*, 2001, vol. 76, p. 211–231, DOI: 10.1016/S0304-4203(01)00064-0.
- Matishov G.G. *Biologicheskii atlas morei Arktiki 2000: plankton Barentseva i Karskogo morei* [Biological atlas of Arctic seas 2000: plankton of the Barents and the Kara seas], NOAA Atlas NESDIS, 2000, vol. 39. (In Russian)
- Nemirovskaya I.A., Khramtsova A.V., Khalikov I.S., Koltovskaya E.V., Solomatina A.S. Uglevodorody v vode i osadkakh Norvezhskogo i Barentseva morei [Hydrocarbons in water and sediments of the Norwegian and the Barents seas], *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2021, no. 4, p. 94–107. (In Russian)
- Nemirovskaya I.A. *Neft' v okeane (zagryaznenie i prirodnye potoki)* [Oil in the ocean (pollution and natural fluxes)], Nauchnyi mir, 2013. (In Russian)
- Nemirovskaya I.A. Raspreделение i proiskhozhdenie uglevodorodov na transarkticheskom razreze cherez morya Sibiri [Distribution and genesis of hydrocarbons along the trans-Arctic section through Siberian seas], *Okeanologiya*, 2021, vol. 61, no. 2, p. 209–219. (In Russian)
- Nemirovskaya I.A., Flint M.V. Osobennosti povedeniya organicheskikh soedinenii v vode i donnykh osadkakh v Karskom more vo vremya skhoda sezonnogo l'da [Specific features of organic compounds behavior in water and bottom sediments of the Kara Sea during the seasonal ice clearance], *Okeanologiya*, 2022, vol. 62, no. 1, p. 64–74. (In Russian)
- Novigatskii A.N., Klyuvitkin A.A., Lisitsyn A.P. Skorosti osadkonakopleniya, vertikal'nye potoki veshchestva i absol'yutnye massy osadkov v shel'fovoi oblasti Rossiiskoi Arktiki [Rates of sediment accumulation, vertical fluxes of matter and absolute volumes of sediments in the shelf part of the Russian Arctic], *Okeanologicheskie issledovaniya*, 2018, vol. 46, no. 2, p. 167–179. (In Russian)
- Novigatskii A.N., Lisitsyn A.P., Shevchenko V.P., Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Politova N.V. [Vertical fluxes of matter in the Arctic Ocean], *Sistema Barentseva morya* [The Barents Sea system], A.P. Lisitsyn (ed.), Moscow, Nauchnyi mir, 2021, p. 278–286. (In Russian)
- Novigatskii A.N., Lisitsyn A.P., Shevchenko V.P., Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Politova N.V. Sedimentogenez v Belom more: vertikal'nye potoki rasseyannogo osadochnogo veshchestva i absol'yutnye massy donnykh osadkov [Sediment generation in the White Sea: vertical fluxes of dispersed sediments and absolute volumes of bottom sediments], *Okeanologiya*, 2020, vol. 60, no. 3, p. 429–441. (In Russian)
- Politova N.V., Shevchenko V.P., Zernova V.V. Distribution, composition, and vertical fluxes of particulate matter in bays of Novaya Zemlya Archipelago, Vaigach Island at the end of summer, *Advances in Meteorology*, 2012, p. 15.
- Sistema Belogo moray, tom II, Vodnaya tolshcha i vzaimodeistviyushchie s nei atmosfera, kriosfera, rechnoi stok i biosfera* [The White Sea system, vol. II, Water column

- and interactions with atmosphere, cryosphere, river runoff and biosphere], A.P. Lisitsyn (ed.), Moscow, Nauchnyi mir, 2012, 784 p. (In Russian)
- Sistema Belogo moray, tom III, Rasseyannyi osadochnyi material gidrosfery, mikrobnnye protsessy i zagryazneniya* [The White Sea system, vol. III, Dispersed sediment matter of the hydrosphere, microbial processes and pollution], A.P. Lisitsyn (ed.), Moscow, Nauchnyi mir, 2013, 668 p. (In Russian)
- Vernadskii V.I. *Khimicheskoe stroenie biosfery Zemli i yeyoe okruzheniya* [Chemical composition of the Earth's biosphere and its surroundings], Moscow, Nauka, 2001, 376 p. (In Russian)
- Yunker M.B., Macdonald R.W., Ross P.S. et al. Alkane and PAH provenance and potential bioavailability in coastal marine sediments subject to a gradient of anthropogenic sources in British Columbia, Canada, *Org. Geochem.*, 2015, vol. 89–90, p. 80–116.

Received 15.04.2021

Revised 16.04.2022

Accepted 27.06.2022