

УДК 551.46(268.4)+574.4:504.05 +574.4:546.027

## ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ МОРЕЙ РОССИЙСКОГО СЕКТОРА АРКТИКИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОГЕННЫХ НАГРУЗОК

Г.В. Ильин, И.С. Усягина, Н.Е. Касаткина

Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН

### Аннотация

Исследован уровень загрязнения природной среды морей российского сектора Арктики в условиях современных техногенных нагрузок. Арктические моря остаются относительно мало загрязненными. Очаги загрязнения в акватории морей и связанные с этим экологические риски определяется развитием хозяйственной деятельности на акватории и на территории водосборных бассейнов. Отмечено снижение радиоактивного загрязнения морской среды по сравнению с периодом неконтролируемой эмиссии 1960-х гг.

### Ключевые слова:

*трансграничный перенос, нефтепродукты, пестициды, радионуклиды, полиароматические углеводороды, парафины, тяжелые металлы, донные осадки, речной сток.*



### Введение

Потребность в ресурсах для экономичного развития приводит к возрастающему вовлечению арктических морских акваторий в сферу хозяйственного освоения. Климатические условия, наличие биологических и ископаемых ресурсов формируют спектр хозяйственного использования водоемов.

Интенсивное природопользование генерирует рост экологических рисков и техногенного загрязнения. На поступление и распределение загрязняющих веществ во многом влияют природные условия. Система североатлантических течений, атмосферная циркуляция, речной сток определяют трансграничный перенос загрязняющих веществ из Западной Европы и континентальной Азии в арктические морские бассейны. Импактное (очаговое) загрязнение арктических окраинных морей и связанные с этим экологические риски формируются эмитентами регионального и локального масштаба. Их активность зависит от хозяйственной деятельности на акватории морей и на территории водосборных бассейнов. В этом контексте следует упомянуть Новоземельский испытательный полигон ядерного оружия и захоронения радиоактивных отходов в Карском море. Норильский и Кольский горнопромышленные комплексы как региональные источники оказывают влияние на загрязнение морских воздушных масс и морской акватории. Перенос антропогенных аэрозолей в Арктику наиболее интенсивен в зимне-весенний период [1]. Каналы переноса и источники загрязнителей имеют различную значимость для каждого из морей (рис.).

Более всего изучена роль речного стока как источника поллютантов. Она адекватна объему стока и уровню промышленно-социального развития расположенных в водосборе хозяйственных центров. Наиболее опасными для экологии морей поллютантами, которые устойчиво циркулируют в компонентах морской среды, остаются пестициды группы ДДТ и ГХЦГ, полихлорированные бифенилы, нефтепродукты, полиароматические углеводороды (ПАУ), радионуклиды, тяжелые металлы. Но, по данным ММБИ за 2003–2013 гг., значимость речного стока как источника радионуклидов снизилась на порядок по сравнению с 1950–1990 годами [2, 3].

Изученность загрязненности арктических морей неодинакова. В большей степени исследованы хозяйственно освоенные бассейны – Баренцево и Белое моря.

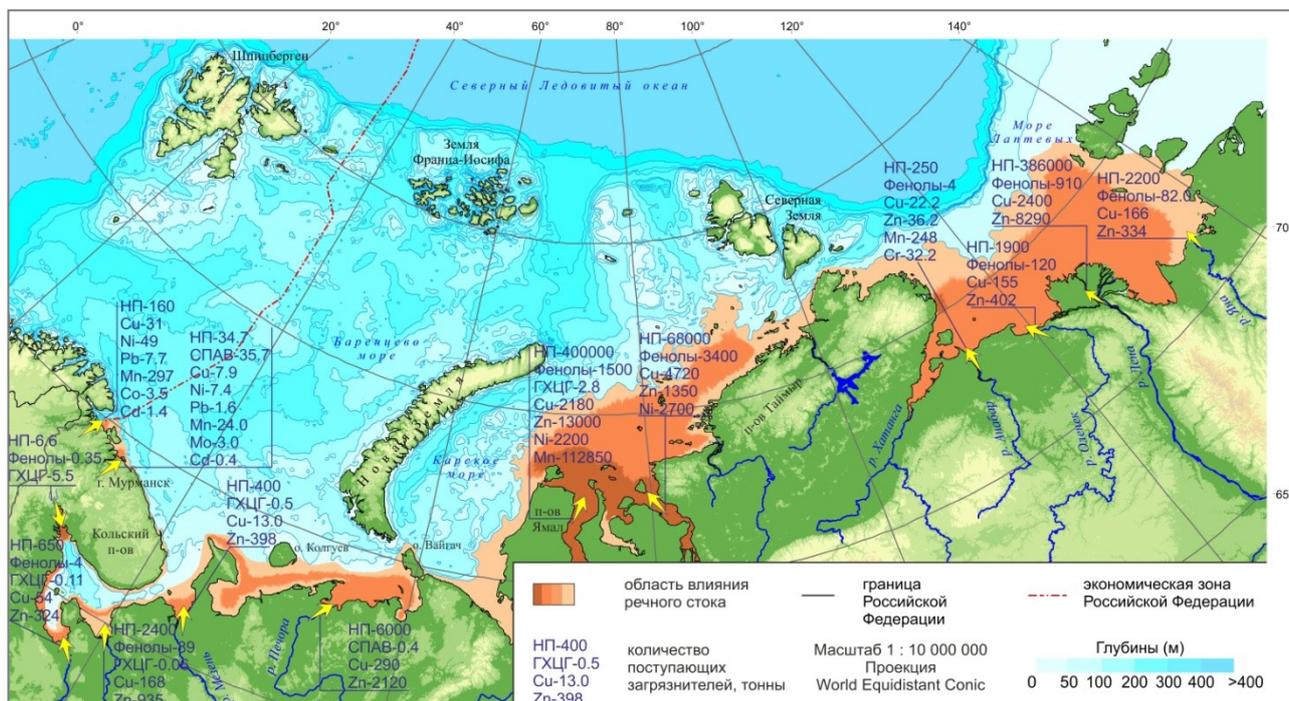


Рис. 1. Объемы выноса загрязняющих веществ с речным стоком и распространение в прибрежной зоне арктических морей

## Материалы и методы

Материалом исследований формирования качества морской среды послужили данные, полученные ММБИ в экспедициях в разные годы последнего десятилетия, в том числе в рамках выполнения международных исследовательских проектов. Анализ собранных в экспедициях проб воды, донных отложений, приповерхностного слоя воздуха, определение концентрации компонентов химического и радионуклидного загрязнения выполнен в аттестованных лабораториях.

## Результаты и их обсуждение

### Баренцево море

Баренцево море имеет свободный водообмен с Норвежским и Гренландским морями. Система теплых атлантических течений формирует гидрофизическую и геоэкологическую ситуацию в южной части моря. Близость европейских промышленных центров определяет высокую значимость трансграничного океанического переноса поллютантов для баренцевоморской экосистемы. С северо-атлантическими водами в бассейн поступают тяжелые металлы, пестициды, нефтепродукты, радионуклиды. Важна роль атмосферного переноса загрязняющих веществ. В виде аэрозолей они приносятся с территорий Северной Европы и Кольского п-ова. Спектр тяжелых металлов, мигрирующих в атмосфере моря, пополняется из региональных источников аэрозолями Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Cr и Hg, ПАУ. Эффект от их поступления возможен в полосе таяния дрейфующего льда, аккумулировавшего атмосферные выпадения в зимний период [4].

В прибрежных районах экологически значима адвекция поллютантов с водами Норвежского прибрежного течения и со стоками Мурманского промышленного узла через

Кольский и Мотовский заливы, губу Печенга. Месторождения руд на территории водосбора определяют повышенный геохимический фон меди, марганца, никеля, железа, алюминия в пресноводном стоке. В юго-восточной части бассейна (Печорское море) источниками загрязнения являются р. Печора и портово-хозяйственный комплекс «Варандей» [4, 5].

*Загрязнение водной среды.* К числу наиболее распространенных загрязнителей морской среды относятся нефтепродукты (НП) или нефтяные углеводороды. Их распространение происходит, главным образом, в поверхностном слое вод. Содержание НП в воде варьирует на разных участках акватории от 0 до 0.1 мг/л (2 ПДК). Их среднегодовое содержание составляет 0.01 мг/л [5, 6]. Неравномерность концентрации обусловлена, в большей степени, гидрологическими процессами – течениями и гидрофронтами.

В прибрежной зоне концентрации НП, превышающие ПДК (0.05 мг/л), отмечаются в обжитых бухтах, иногда в зонах прибрежных гидрофронт. В воде Кольского и Мотовского заливов, губы Териберской в единичных случаях наблюдали концентрации выше 5 ПДК. В Печорском море через морские терминалы осуществляется круглогодичная перевалка нефти, добываемой на материковых месторождениях (терминал «Варандей») и Песчаноозерском месторождении (о. Колгуев). На акватории этого моря содержание НП меняется от 0 до 0.02 мг/л, но в локальных участках иногда повышается до 0.1 мг/л [4, 5].

Состав парафиновой группы углеводородов представлен соединениями от  $C_{10}$  до  $C_{30}$ . Их суммарное содержание – от 1 до 20 мкг/л. В локальных участках отмечается концентрация около 90 мкг/л. В структурном ряду парафинов преобладают короткоцепочные алканы  $C_{12}$ – $C_{22}$ . Углеводороды растительного и бактериального происхождения ( $C_{20-25}$ ) составляют 30–33%. В зоне побережья, особенно в водах Мотовского и Кольского заливов, преобладают легкие парафины нефтяного происхождения.

Суммарное содержание ПАУ в воде низкое (12–80 нг/л), а их композиционный состав беден. Рост концентрации происходит в прибрежных районах и у западной окраины моря. Повсеместно отмечены перилен, пирен, фенантрен, флуорен, флуорантен и бенз(b+k)флуорантен. По концентрации и частоте встречаемости доминируют перилен и бенз(b+k)флуорантен – индикаторы техногенных выбросов. Бенз(a)пирен и другие канцерогенные ПАУ наблюдаются эпизодически. В районах нефтегазовых структур содержание ПАУ в придонном слое воды растет до 260–330 гн/л [4, 6].

Несмотря на отдаленность Баренцева моря от сельскохозяйственных районов, в водной среде локально обнаруживаются пестициды. Распространены метаболиты ДДТ: *p*'*p*-ДДЕ, *p*'*p*-ДДД, *o*'*p*-ДДД, *o*'*p*-ДДТ, *p*'*p*-ДДТ. Их суммарное количество (1.84–3.25 нг/л) ниже уровня ПДК. Повышение концентраций регистрируется эпизодически на участках фронтальных зон и в побережье Западного Мурмана. Соотношение метаболитов ДДТ/ДДЕ ( $\approx 2$ ) характерно для малотрансформированного препарата. Очевидно, что ДДТ поступает в Баренцево море в основном с атлантическими водами и водами Норвежского прибрежного течения. В Печорском море концентрация ДДТ снижается до 0.05–0.5 нг/л [4, 5].

Другой распространенный комплексный пестицид – гексахлорциклогексан (ГХЦГ) – также распространен в южной части моря, но имеет более низкие концентрации. В составе ГХЦГ обнаруживаются  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - изомеры. Соотношение метаболитов смещено в сторону  $\gamma$ -изомера. По-видимому, с атлантическими водами периодически поступает препарат ГХЦГ недавнего применения. Отмечена тенденция снижения концентраций с 1.7 до 0.7 нг/л от западной периферии моря на восток, к мысу Святой Нос.

Полихлорированные бифенилы (ПХБ) – распространенный техногенный загрязнитель. По наблюдениям, эти соединения обнаруживаются на локальных участках акватории. Их содержание в воде намного ниже ПДК [7]. Вода Мотовского залива может содержать около 2.5 нг/л в поверхностном слое и около 1.2 нг/л – в придонном. Повышение концентраций до 4.5 нг/л отмечено во фронтальных зонах моря и в побережье. В придонном слое участков

открытого моря концентрация ПХБ не превышает 0.5 нг/л и увеличивается в прибрежной зоне до 0.7–0.9 нг/л. Загрязненность вод Печорского моря составляет 0.05–1.8 нг/л [4].

Ветви Северо-Атлантического течения служат основным каналом поступления радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в Баренцево море. Речной сток, атмосферные выпадения играют в настоящее время второстепенную роль в загрязнении водоема. В период с 1950 по 2009 гг. по указанным каналам в море поступило около  $37.5 \cdot 10^3$  ТБк  $^{137}\text{Cs}$  и  $24.8 \cdot 10^3$  ТБк  $^{90}\text{Sr}$ . Большая часть поступивших изотопов ( $26 \cdot 10^3$  ТБк  $^{137}\text{Cs}$  и  $19.5 \cdot 10^3$  ТБк  $^{90}\text{Sr}$ ) выведена из бассейна в процессе водообмена через северные и восточные границы моря. Вынос и рассеяние радионуклидов, сокращение их эмиссии определили снижение концентрации и сглаживание различий в распределении. Современная активность  $^{137}\text{Cs}$  в областях распространения атлантических вод: Рыбачья, Мурманская, Демидовская банки, Центральное плато варьирует от 0.4 до 2.5 Бк/м<sup>3</sup>, а активность  $^{90}\text{Sr}$  – от 0.5 до 9 Бк/м<sup>3</sup>. В полярной водной массе на возвышенностях Персея и Центральной активности  $^{137}\text{Cs}$  составляет 0.9–2.5 Бк/м<sup>3</sup>,  $^{90}\text{Sr}$  – 1.8–6.5 Бк/м<sup>3</sup>.

*Донные отложения.* Морские донные отложения накапливают загрязняющие вещества (ЗВ), растворенные в водной среде и сорбированные взвесью. Неравномерность их накопления определяется гидродинамическим переносом и аккумуляцией осадочного материала. При изменении условий начинается обратный процесс – десорбция и поступление поллютантов в водную среду, так называемое «вторичное загрязнение».

Накопление нефтепродуктов в донных отложениях открытых районов Баренцева моря весьма мозаично, а их концентрация меняется в интервале от следовых величин до 80 мкг/г сухого осадка. Наиболее высокие концентрации отмечены в отложениях прибрежной зоны и Центрального желоба, где происходит аккумуляция тонкодисперсных фракций. Близ Кольского и Мотовского заливов концентрации НП повышены до 120–700 мкг/г.

Для оценки указанных величин в качестве нормирующего показателя приведем норматив агентства по контролю загрязнения Норвегии (SFT) – ориентировочно допустимую концентрацию (ОДК) НП в незагрязненных морских осадках, 50 мг/г сухого осадка [8].

Структурный состав парафинов в донных осадках шире, чем в водной среде. В области Мурманского мелководья для осадков характерно смешение углеводородов нефтяного и биогенного генезиса. Здесь доминируют две группы парафинов  $\text{C}_{12}$ – $\text{C}_{17}$  и  $\text{C}_{18}$ – $\text{C}_{24}$  (30% и 45% общей массы соответственно). Рост концентрации биогенных парафинов  $\text{C}_{20}$ – $\text{C}_{21}$  и  $\text{C}_{25}$ – $\text{C}_{26}$  обычно отмечается в период развития микроводорослей. Короткоцепочные соединения  $\text{C}_{10}$ – $\text{C}_{14}$  нефтяного генезиса фрагментами обнаруживаются на всех участках дна, но более всего они распространены в отложениях Центрального желоба, что может быть вызвано элиминацией легких углеводородов из осадочного чехла [4].

Распределение ПАУ в донных осадках неравномерно. В южной и центральной частях моря их содержание составляет 20–400 нг/г сухого осадка. Для открытых районов моря характерно накопление ПАУ природного генезиса – хризена и фенантрена. Незначительную долю в композиционном составе на всех участках дна составляет группа типично нефтяных ПАУ – нафталины, антрацен, инден. Близ устья Кольского залива, в Мотовском заливе, в Варангер-фиорде концентрация ПАУ (до 150 нг/г) многократно ниже порога «загрязнения» по классификации SFT (выше 2 тыс. нг/г). Доминируют соединения нефтяного генезиса нафталин и флуорантен – индикаторы антропогенного пресса на прибрежную зону. Повышенное накопление происходит в отложениях Центрального желоба и губ с инфраструктурой портов. Осадки внутренней части губ Печенга, Ура, южного и среднего колен Кольского залива загрязнены больше, чем устьевые части заливов. На локальных участках губ содержание ПАУ временами повышается до уровня «слабого загрязнения».

Еще более высокое накопление ПАУ происходит в прибрежье Шпицбергена – до 7000 нг/г сухого осадка. В составе ПАУ преобладают пирогенные соединения: пирен, бенз- и дибенз-антрацены, флуорантен, и прочие, обладающие канцерогенными свойствами. Концентрация бенз(а)пирена – от 0 до 14 нг/г [4, 6].

В Печорском море концентрация ПАУ составляет 5–80 нг/г сухого осадка. На участках нефтегазовых структур доминируют нафталин (5–40 нг/г) и флуорантен (0.2–0.4 нг/г). Концентрация бенз(а)пирена в этом районе мала – 0.0–5.2 нг/г сухого осадка [4].

Накопление ПХБ в донных отложениях открытых районов моря составляет в среднем 0.3 нг/г сухого осадка. В 35 % проб эти соединения не были обнаружены. Повышение концентрации до 1.0–1.5 нг/г происходит в осадках Центрального желоба и в прибрежье – до 2.5 нг/г. Состав ПХБ в отложениях шире, чем в воде, представлен соединениями № 28, 31, 52, 101, 105, 118, 138, 153, 180. Основную массу образуют конгинеры № 52, 118, 138, 153.

В прибрежной зоне отмечен рост концентрации ПХБ в западном направлении. В осадках Варангер-фьорда концентрация загрязнителя местами возрастает до 4.0 нг/г. Повышенные концентрации (4–19 нг/г сухого осадка) наблюдали в осадках губы Печенга. В осадках Мотовского залива накапливается около 2.5 нг/г. В осадках Печорского моря концентрация ПХБ варьирует от 0.05 до 2.3 нг/г сухого осадка.

Накопление стойких хлорорганических пестицидов в баренцевоморских осадках также ниже ОДК для незагрязненных осадков (< 500 нг/г сухого осадка по SFT). Суммарная концентрация ДДТ варьирует от 0.4 до 15.8 нг/г, составляя в среднем 3.3 нг/г. Максимальные концентрации характерны для отложений Центрального желоба. Основную массу ДДТ (в среднем 55 %) составляет изомер *p'p'*-ДДТ. В осадках прибрежной зоны концентрация ДДТ понижена (0.5–1.5 нг/г сухого осадка) по сравнению с открытыми районами.

Концентрация ГХЦГ в осадках открытого моря изменяется от 1.5 до 5.2 нг/г, составляя в среднем 3.1 нг/г. Содержание  $\gamma$ -изомера ГХЦГ (линдана) превышает 50% общей суммы ГХЦГ. Максимум концентраций отмечен в осадках Мурманского мелководья. В Мотовском заливе суммарная концентрация ГХЦГ около 0.65 нг/г, доля линдана составляет 73% как результат инвазии препарата недавнего применения.

С водами теплых течений ксенобиотики распространяются в удаленные высокоширотные районы моря и обнаруживаются в осадках желобов Персея, Франца-Виктории, прибрежья ЗФИ, Шпицбергена, Новоземельской банки. Концентрация ДДТ и ГХЦГ меняется в разных районах от нуля до 7–8 нг/г сухого осадка. Неравномерное соотношение хлорорганических пестицидов на этих участках отражает изменчивое влияния океанографических факторов.

Тяжелые металлы, за исключением железа и марганца, не образуют в осадках высоких концентраций (табл. 1). Их относительное увеличение отмечено в глубоководном Центральном желобе. Для осадков Печорского моря характерны пониженные концентрации. Мозаичность их распределения зависит от доли пелитовой и алевроитовой фракций осадка.

В узкой прибрежной зоне, особенно в губах, медь, кобальт, цинк, никель и хром образуют второй максимум концентраций. Формирование этого максимума определяется материковым стоком и осаждением металлов в зоне смешения вод.

Содержание радиоизотопов в донных отложениях низкое:  $^{137}\text{Cs}$  – 0.2–7 Бк/кг;  $^{90}\text{Sr}$  – 0.1–2. Бк/кг сухого осадка. Вследствие сорбционной подвижности цезия его концентрация в осадках изменяется более динамично, чем концентрация  $^{90}\text{Sr}$ . Между долей пелитовой фракции в осадке (размер зерен < 0.01 мм) и накоплением  $^{137}\text{Cs}$  существует корреляционная связь [9]. Поэтому в отложениях желобов, накапливающих глинистые илы и служащих каналами распространения атлантических вод, количество  $^{137}\text{Cs}$  повышено. В алевроито-илисто-песчаных осадках Центральной возвышенности, Персея и Центрального плато  $^{137}\text{Cs}$  собирается до 0.8–2.9 Бк/кг сухого осадка. В Печорском море разнотерные пески содержат 0.2–1.7 Бк/кг сухого осадка [2, 3].

Концентрация тяжелых металлов и микроэлементов в осадках Баренцева моря, мкг/г сухого осадка

Район локализации	Pb	Co	Cu	Ni	Cd	Fe*	Cr	Mn	Zn	As	Hg	Sn
Центральный желоб	7–18	1–5	12–35	20–50	0.0–0.3	38–60	32–54	160–470	70–85	7–67	0.03–0.07	1–7
Южная часть моря	2–18	1–3	10–20	18–31	0.0–0.10	14–30	18–38	151–280	40–70	2–24	0.0–0.07	0.7–3.0
Печорское море	1–6	0.4–1.5	3–8	1–3	0.0–0.1	–	1.4–4.0	21–115	4–10	0.4–1.2	0.01–0.02	0.0
Прибрежная зона и губы	5–10	3–30	4–80	12–24	0.0–0.15	9–17	18–57	128–240	26–150	1–15	0.03–0.10	1–4
ОДК <sub>0</sub> **	<30	–	<35	<30	<0.25	–	<70	–	<150	<20	<0.15	–

\* Концентрации железа приведены в мг/г сухого осадка.

\*\*ОДК<sub>0</sub> – ориентировочно допустимые концентрации для незагрязненных осадков по SFT [8]

*Баланс радионуклидов.* В результате расчета годовых балансов радионуклидов их современное содержание в Баренцевом море оценено величинами  $11.6 \cdot 10^3$  ТБк  $^{137}\text{Cs}$  и  $5.3 \cdot 10^3$  ТБк  $^{90}\text{Sr}$ . Большая часть радиоизотопов поступает по системе течений через Норвежское море как следствие сбросов западноевропейских радиохимических заводов. Годовой приток  $^{90}\text{Sr}$  с водами и взвешенным веществом превышает расход. Поступление  $^{137}\text{Cs}$  было выше его выведения до 1980-х гг., в последние два десятилетия баланс отрицателен. Донные отложения депонируют в настоящее время около 447 ТБк  $^{137}\text{Cs}$  и 75 ТБк  $^{90}\text{Sr}$ .

В пищевую сеть вовлекается лишь незначительная часть изотопов. Их накопление морской биотой рассчитано как сумма активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в компонентах пищевой сети. Суммарная активность  $^{137}\text{Cs}$  составляет около 0.1 ТБк, а  $^{90}\text{Sr}$  – 0.9 ТБк. Основная масса поглощенного  $^{137}\text{Cs}$  заключена в зоопланктоне и бентосе. Рыбы накапливают  $^{90}\text{Sr}$  в костных скелетах. Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в рыбе по данным 2010–2014 гг. не превышает 0.1 Бк/кг. Макрофиты прибрежной зоны моря содержат  $^{137}\text{Cs}$  около 1.5 Бк/кг сухой массы.

### Белое море

Распространение загрязняющих веществ в Белом море происходит, главным образом, со стоковыми течениями крупных рек (рис.). Через устьевые участки рек в прибрежную зону моря сбрасывается около 250.5 млн м<sup>3</sup> сточных вод. Зонами аккумуляции поллютантов становятся Онежский, Двинской, Кандалакшский и Мезенский заливы, а также центральная глубоководная область моря – бассейн с замкнутой системой циркуляции вод. Сброс поверхностных и коммунальных стоков формирует в заливах устойчиво повышенный уровень концентраций железа и молибдена (до 2 ПДК), эпизодически – меди. Загрязняющие вещества частично выносятся в Печорское море.

Для Белого моря повышена роль атмосферного переноса загрязняющих веществ. Зимой система преобладающих ветров образует в Баренцево-Карском регионе циркуляцию циклонической направленности, при которой в район Белого моря затягиваются воздушные массы с Кольского п-ова и Северной Европы. Концентрация металлов (кроме меди) в атмосфере над Белым морем значительно выше, чем в Норвежском и Баренцевом морях [1].

*Водная среда.* Белое море, в отличие от Баренцева, принимает значительно больший объем материкового стока. Северная Двина служит наиболее значимым источником загрязняющих веществ. Вода в устьевых участках и взморье рек Северная Двина, Онега в среднем содержит около 0.04 мг/л нефтепродуктов. Меньшая загрязненность характерна для Мезенского залива – около 0.01 мг/л. Временами содержание НП в заливах может повышаться до двух ПДК.

В центральной части моря концентрация нефтяных углеводородов варьирует от 0 до 0.08 мг/л. Но эпизодически отмечаются повышенные концентрации [5].

Алифатические углеводороды в беломорской воде содержатся в меньшем количестве, чем в воде Баренцева моря – от 5 до 30 мкг/л. Парафины имеют преимущественно биогенное происхождение. В Двинском и Кандалакшском заливах, где концентрация алканов повышена, идентифицируются соединения нефтяного генезиса [10].

В составе растворенных в воде ПАУ обнаруживаются антрацен, бенз(а)пирен, бенз(б)флуорантен, фенантрен, пирен. Доминируют пирен и бенз(а)пирен, что является следствием выбросов аэрозолей промышленным узлом Архангельск–Новодинск [10].

Распространение пестицидов в воде Беломорского бассейна недостаточно исследовано, и по современным данным ограничивается прибрежной частью моря. Даже максимальные концентрации пестицидов, наблюдаемые в водной среде Белого моря, ниже уровня ПДК (10 нг/л). Их нахождение в бассейне обусловлено стоком Северной Двины. В Двинском заливе обнаруживаются пестициды группы ГХЦГ. Средняя и максимальная концентрация изомера  $\alpha$ -ГХЦГ составляет 0.2 и 0.4 нг/л соответственно, а изомера  $\gamma$ -ГХЦГ – 0.4 и 0.8 нг/л. Пестициды группы ДДТ в воде регистрируются эпизодически [5].

Уровень концентрации тяжелых металлов в воде известен по исследованию Кандалакшского залива, в котором аккумулируется сток рек Кольского п-ова. Для вод залива характерно устойчивое превышение рыбохозяйственных норм (около 2 ПДК) по содержанию меди, молибдена и железа [5, 7].

Радиоактивное загрязнение вод Белого моря низкое. По данным ММБИ за 2011–2014 гг. среднее содержание  $^{137}\text{Cs}$  составляет 1.2 Бк/м<sup>3</sup>,  $^{90}\text{Sr}$  – 1.5 Бк/м<sup>3</sup>.

*Донные отложения.* Распределение нефтяных углеводородов в донных отложениях имеет сходство с их распределением в воде. Максимальные концентрации НП отмечаются в осадках Двинского и Кандалакшского заливов. Суммарное содержание нефтяных углеводородов варьирует от 4 до 33 мг/кг сухого осадка.

Концентрация парафинов в донных осадках изменяется от 0.8 до 12.5 мкг/г сухого осадка. Это соответствует их содержанию в незагрязненных арктических районах – в море Бофорта, Лаптевых и др. В Двинском и Кандалакшском заливах алканы имеют нефтяное происхождение. В устьевых частях заливов состав алканов представлен преимущественно терригенными соединениями, а центральной части моря – биогенными [10].

Суммарное содержание ПАУ варьирует в диапазоне 13–208 нг/г сухого осадка. Для осадков Белого моря характерны ПАУ пирогенного происхождения – бензфлуорантен, бензпирены, бензперилен, типичных для атмосферных выпадений промышленных центров. В глинистых осадках Двинского и Кандалакшского заливов повышено суммарное содержание ПАУ и бенз(а)пирена (10 нг/г сухого осадка). В то же время в осадках заливов значительна доля ПАУ типично терригенного происхождения – перилена и хризена. Концентрация терригенных ПАУ резко повышается в зонах разгрузки речного стока – в вершинных частях заливов. От центральной части моря (бассейна) к Горлу концентрация ПАУ снижается соответственно от 80 нг/г до 47, а далее, к устью Воронки – до 16 нг/г. И даже в южной прибрежной части моря накопление ПАУ (около 60 нг/г) ниже, чем в осадках депрессии бассейна. В целом, накопление ПАУ существенно ниже уровней, допустимых для незагрязненных осадков – < 300 мкг/г сухого осадка [8].

Уровень тяжелых металлов накопления низкий, мкг/л: Cu – 0.5–16; Pb – 1.9–63; Co – 0.7–19.9; Cr – 1.2–17.1; Ni – 1.6–34.1; Hg – 0.04–0.1; Ni – 30 сухого осадка. В отложениях Кандалакшского и Двинского заливов отмечено повышение концентрации тяжелых металлов по сравнению с осадками бассейна.

Средняя удельная активность радионуклидов в осадках Белого моря по наблюдениям ММБИ невысока, Бк/кг:  $^{137}\text{Cs}$  – 3;  $^{90}\text{Sr}$  – 0.4 сухой массы. Однако отмечены участки импактного загрязнения изотопами – Двинская губа, впадина Кандалакшского залива, Горло Белого моря.

На этих участках удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  повышена на порядок, до 22–31 Бк/кг сухой массы, что связано с поступлением радионуклидов от местных источников [9].

### **Карское море**

Загрязняющие вещества в Карское море поступают с обильным стоком рек, обладающих обширными хозяйственно освоенными водосборными бассейнами. Речные воды участвуют в формировании устойчивой системы ветровых и плотностных течений в морском бассейне, образуя ветви Обь–Енисейского и Западно-Таймырского течений. Летом воды поверхностного стока проникают далеко в море (рис.). Реками Обь, Надым, Таз, Енисей в Карское море переносится от 470 до 535 тыс. т нефти и нефтепродуктов; от 3 до 83.5 т ГХЦГ ( $\alpha$ - и  $\gamma$ -изомеры); около 9.5 т ДДТ и ДДЕ, соли тяжелых металлов и фенолы. С материковым стоком поступает около 1 %  $^{137}\text{Cs}$  и 4.7 %  $^{90}\text{Sr}$  [1, 2].

Водообмен с Баренцевым морем – источник загрязняющих веществ в локальных участках проникновения этих вод в Карское море. Источником поллютантов служит также поток атлантических вод по желобам Святой Анны и Воронина. В районе их распространения отмечены повышенные концентрации нефтяных углеводородов и ПАУ. Через новоземельские проливы осуществляется трансграничный перенос приблизительно 64 %  $^{137}\text{Cs}$  и 47 %  $^{90}\text{Sr}$  поступающих в Карское море радионуклидов.

В зимний период Норильский ГМК воздействует на воздушную среду Карского моря вплоть до высокоширотных районов благодаря господству северных ветров. В спектре загрязнителей присутствуют Pb, Ni, Cu, Cr, Hg, Cd, Co, Mn, хлорорганические пестициды – ГХЦГ и ДДТ. Некоторые поллютанты содержатся в аэрозолях в большей концентрации, чем в Печорском море. В частности, это пестициды, хром, кадмий, кобальт, марганец. Влияние золотого переноса определяет и загрязненность ледового покрова прибрежных участков.

Воздействие атмосферных выпадений  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  на современное радиоактивное загрязнение Карского моря незначительно.

*Водная среда.* Основной поток нефтепродуктов поступает со стоками Оби и Енисея. Распределение нефтепродуктов на акватории неравномерно. Их концентрация варьирует от 0.00 до 0.04 мг/л, а в среднем составляет 0.02 мг/л, т.е. ниже уровня ПДК.

В воде регистрируется относительно широкий спектр ПАУ, их средняя суммарная концентрация около 115 нг/л. В комплексе ПАУ преобладают нафталины (27 %) – типично нефтяные соединения. Пирен, флуорантен и алкилзамещенные ПАУ пирогенного генезиса составляют лишь около 2 %. Доля ПАУ естественного геохимического фона (фенантрен) в среднем около 15 %. Оставшаяся часть ПАУ представлена техногенными полиаренами. Доля бенз(а)пирена в воде ниже 1 % от суммарного количества ПАУ. Общее содержание ПАУ в воде Карского моря ниже, чем в прибрежной зоне Баренцева моря, а их качественный состав практически такой же, хотя водоем и удален от крупных промышленных центров. Основное поступление ПАУ в бассейн обеспечивается, по-видимому, поверхностным стоком с территории водосбора и атмосферными выпадениями.

Хлорорганические пестициды групп ДДТ и ГХЦГ обнаруживаются лишь в очень небольших количествах в верхнем слое воды. Содержание метаболитов ДДТ составляет около 1 нг/л, на порядок ниже уровня ПДК. В группе ГХЦГ преобладает изомер  $\alpha$ -ГХЦГ – 0.4 нг/л. Изомер  $\gamma$ -ГХЦГ содержится в количестве около 0.3 нг/л. По соотношению метаболитов ( $\text{ДДТ/ДДЕ} < 1$ ;  $\alpha\text{-ГХЦГ}/\gamma\text{-ГХЦГ} < 1$ ) видно, что пестициды поступают в бассейн уже в метаморфизированном виде по отношению к исходным техническим препаратам. Средняя концентрация семи основных («голландских») конгинеров ПХБ составила 1.0 нг/л.

Концентрация тяжелых металлов в верхнем слое воды Карского моря ниже ПДК для рыбохозяйственных водоемов (табл. 2) и ниже, чем в водах Баренцева моря [5, 7]. Тем самым подчеркивается роль геохимии водосборных территорий и водообмена с Баренцевым морем.

Диапазон активности  $^{137}\text{Cs}$  относительно узок, от следовой активности ( $\text{мда} < 1 \text{ Бк/м}^3$ ) до  $2.5 \text{ Бк/м}^3$ . Повышенные концентрации  $^{137}\text{Cs}$  (до  $2.5 \text{ Бк/м}^3$ ) наблюдали в водах Восточно-Новоземельского желоба, что вызвано особенностями океанографического режима – адвекцией вод из Баренцева моря через пролив Югорский Шар, материковым стоком с побережья Новой Земли. Низкая активность  $^{137}\text{Cs}$  (до  $0.8\text{--}1.7 \text{ Бк/м}^3$ ) характерна для мелководных участков центральной части моря и Обь-Енисейского мелководья.

Диапазон активности  $^{90}\text{Sr}$  варьирует в интервале  $1\text{--}15 \text{ Бк/м}^3$ . Повышенные концентрации радионуклида отмечены в мелководных частях моря, подверженных воздействию стока Оби и Енисея. В водах Восточно-Новоземельского желоба, как и у северо-восточной границы моря, активность изотопа, наоборот, понижена –  $1.5\text{--}3.5 \text{ Бк/м}^3$ .

Таблица 2

Концентрация тяжелых металлов в поверхностном слое воды Карского моря, мкг/л

Металл	Mn	Zn	Cu	Ni	Pb	Co	Cd	Sn
Средняя концентрация	1.9	1.7	0.82	0.14	0.5	0.1	0.13	0.14
ПДК	50	50	5	10	10	10	10	112

Многолетний ряд наблюдений позволил выявить тенденции к снижению концентраций цезия-137 и стронция-90 в воде Карского моря, которые описываются экспоненциальными кривыми:

$$y = 12.116e^{-0.0735x}, R^2 = 0.6465 \text{ (для } ^{137}\text{Cs)};$$

$$y = 20.119e^{-0.0394x}, R^2 = 0.5327 \text{ (для } ^{90}\text{Sr)},$$

где  $x$  – количество лет, прошедших после максимума загрязнения.

Период уменьшения объемной активности  $^{137}\text{Cs}$  в воде в 2 раза происходит за 9.5 лет,  $^{90}\text{Sr}$  – за 17.5 лет. Для сравнения: в Баренцевом море эти показатели составляют 6 и 12 лет соответственно [3].

*Донные отложения.* В донных отложениях южной части моря уровень накопления нефтепродуктов изменяется от 6.5 до 8 мкг/г сухого осадка. Их средняя концентрация составляет 7.5 мкг/г сухого осадка. Такой низкий уровень соответствует наиболее «чистым» участкам Баренцева моря.

Накопление парафинов в осадках Карского моря существенно выше, чем в осадках различных зон Баренцева моря. Распределение парафинов в осадках мало зависит от их литотипа и в большей степени определяется потоками атлантических и речных вод. Для осадков прибрежных мелководий характерна наиболее низкая концентрация парафинов – от 150 до 400 нг/г сухого осадка. Доминируют соединения преимущественно биогенного происхождения, входящие в состав липидов планктонных организмов ( $\text{C}_{15}\text{--}\text{C}_{19}$ ) и восков наземных растений ( $\text{C}_{23}\text{--}\text{C}_{29}$ ). Гидродинамика этой области обусловлена распространением прибрежных и смешанных вод Восточно-Новоземельского и Обско-Енисейского течений. В осадках северо-западной периферии моря уровень накопления парафинов выше –  $500\text{--}800 \text{ нг/г}$ . Гидрологический режим этой части определяется поступлением вод из Баренцева моря и Арктического бассейна. Повышенная концентрация короткоцепочных, типично нефтяных парафинов  $\text{C}_{12}\text{--}\text{C}_{14}$  отмечена во фронтальной области атлантических вод, поступающих из пролива Святой Анны, что может быть следом антропогенного загрязнения атлантических вод нефтепродуктами. Осадки центральной части моря, которая включает нефтегазоносные структуры: Русановскую, Ленинградскую и Обручевскую, выделяются максимальным содержанием парафинов –  $1\text{--}7 \text{ тыс. нг/г}$ . Резкие отклонения концентраций в районе нефтяных месторождений обусловлены природными эпигенетическими процессами – миграционным потоком углеводородов из недр осадочного чехла. Преобладают парафины  $\text{C}_{20}\text{--}\text{C}_{26}$ , компоненты метаморфизации органического вещества.

Распределение ПАУ в осадках неравномерно – от 6 до 90 нг/г сухого осадка. Выделяются два участка повышенного содержания, которые локализованы в области устья части Оби и в прибрежье о. Вайгач. На большей части морской акватории доминируют антрацен и флуорантен – полиарены преимущественно антропогенного генезиса. Типично нефтяные биядерные ПАУ – нафталин и его метиллированные гомологи, обнаруживаются на всей акватории моря. Суммарное содержание нафталинов около 10% ΣПАУ. Высокий уровень их накопления (до 48 %) характерен для ареалов смешения Обь–Енисейского стока с морскими водами. Распределение бенз(а)пирена (0.0–2.4 нг/г сухого осадка) в отложениях Карского моря в целом совпадает с закономерностями о распределения ΣПАУ [6].

Хлорорганические соединения содержатся в очень малых количествах в осадках южной части моря. Суммарная концентрация соединений ГХЦГ составляет от 0.25 до 1.0 нг/г сухого осадка (среднее содержание 0.5 нг/г). Пространственная изменчивость концентраций ДДТ незначительна – от 0.3 до 0.6 нг/г. Средняя суммарная концентрация ДДТ – 0.4 нг/г. Гексахлорбензолы накапливаются в осадках в концентрациях 0.1–0.4 нг/г сухого осадка. В целом уровень накопления пестицидов ниже, чем в осадках Баренцева моря и много ниже ориентировочного уровня для незагрязненных осадков (< 500 нг/г по SFT).

В композиционном составе ПХБ обнаруживается до 15 конгинеров, их суммарная концентрация изменяется от 2.7 до 4.2 нг/г сухого осадка. Наиболее широко распространены конгинеры № 28, 31, 52, 101, 105, 118, 138, 153. Накопление ПХБ в южной части моря определяется влиянием речного стока [5].

Также влиянием поверхностного стока определяется накопление тяжелых металлов. В южной части моря отмечено повышенное накопление меди, никеля, кадмия, олова и мышьяка, что может быть связано с особенностями геохимического фона водосборного бассейна и воздействием Норильского ГМК (табл. 3) [5].

Таблица 3

Концентрация тяжелых металлов и микроэлементов в поверхностном слое донных отложений Карского моря, мкг/г сухого осадка

Металл	Mn	Zn	Cu	Ni	Pb	Co	Cd	Sn	Cr	Hg	As
Средняя концентрация	214	28.3	36.2	34.7	14.2	5.37	0.18	33.5	12.6	0.001	18.7
ОДК <sub>0</sub>	---	<150	<35	<30	<30	---	<0.25	---	<70	<0.15	<20

Удельная активность <sup>137</sup>Cs в донных отложениях варьируется на участках дна от следовых значений до 12 Бк/кг. Неравномерность распределения обусловлена главным образом морфологией дна, а, следовательно, гидродинамикой и литотипом осадков. Донные отложения в районе Восточно-Новоземельского желоба представлены в основном глинисто-илистыми отложениями с примесью песка. Для этих осадков характерны участки повышенной активности <sup>137</sup>Cs – до 12 Бк/кг сухого осадка. На мелководных участках моря концентрация <sup>137</sup>Cs ниже минимально детектируемой активности (МДА < 1 Бк/кг). Гидродинамический режим придонных вод создает условия интенсивного промывания осадков на мелководье и низкий уровень накопления радионуклидов в промытых песчаных осадках. Лишь на локальных участках регистрируется активность до 5 Бк/кг.

Удельная активность <sup>90</sup>Sr в донных отложениях ниже, чем в водной среде, что вызвано низкой сорбционной способностью радионуклида. В основном он остается в водной фазе и слабо накапливается взвесью. Поэтому даже в зоне смешения речных и морских вод, в так называемой зоне маргинального фильтра, не происходит накопление <sup>90</sup>Sr.

Анализ многолетней динамики среднегодовой активности изотопов цезия и стронция в донных отложениях Карского моря выявил, что за прошедшие тридцать лет произошло снижение концентраций  $^{90}\text{Sr}$  в 3 раза,  $^{137}\text{Cs}$  почти в 5 раз.

### **Море Лаптевых**

Источники загрязнения этого водоема изучены мало. Основным из них следует считать сток р. Лена. Относительно крупный промышленный источник поллютантов в бассейне – порт Тикси. Характерные загрязняющие вещества – нефтепродукты, фенолы, соединения железа, меди и свинца. Среднегодовая концентрация большинства загрязняющих веществ в реках не превышает 1–3 ПДК. Вынос нефтепродуктов в прибрежье отдельными реками варьируется, а в целом может достигать 390 тыс. т. Более 98 % этого количества попадает в море с водами р. Лена (рис.) [5].

*Водная среда.* Среднее содержание нефтепродуктов в водах моря Лаптевых не превышает 0.04 мг/л. Максимальные концентрации нефтепродуктов наблюдаются в воде губы Буор-Хая в районе п. Тикси – до 0.08 мг/л – около 1.5 ПДК.

Концентрация пестицидов много ниже ПДК. Сток хлорорганических пестицидов с речными водами не отмечен. Тем не менее, соединения ДДТ обнаруживаются в воде южной части моря – 0–1.3 нг/л; а соединения ГХЦГ – 0.03–2.05 нг/л. Повышенные концентрации свойственны прибрежным районам, устьям рек.

Радиоактивное загрязнение моря Лаптевых в современный период характеризуется как низкое. Среднее содержание  $^{137}\text{Cs}$  в поверхностных водах по данным 2013 гг. составляет около 1.6 Бк/м<sup>3</sup>,  $^{90}\text{Sr}$  – около 3.5 Бк/м<sup>3</sup>.

*Донные отложения.* Повышенной концентрацией нефтяных углеводородов и ПАУ в осадках выделяются приустьевые области, область материкового склона и подножия. Устьевые области рек формируют вдоль побережья обширную зону маргинального фильтра. По желобам, секущим материковый склон, «мутьевые потоки» переносят загрязненные шельфовые осадки к подножию и определяют ареалы повышенной концентрации нефтепродуктов и ПАУ на больших глубинах. В донных отложениях шельфовой части моря уровень накопления нефтепродуктов составляет от 10 до 180 мкг/г сухого осадка. Наиболее высокие концентрации нефтепродуктов отмечены в осадках губы Буор-Хая – до 180 мкг/г, и в Хатангском заливе – до 86 мкг/г [5]. Эти концентрации значительно выше, чем в других арктических морях и соответствуют хозяйственно развитым участкам побережья Баренцева моря. В мелководной части моря суммарная концентрация ПАУ варьирует в пределах 13–40 нг/г сухого осадка. Основу композиционного состава ПАУ составляют пирогенные полиарены и петрогенные арены, принесенные речным стоком. Максимальное содержание ПАУ локализовано в устьевой зоне р. Лена. В осадках глубоководной части моря общее содержание ароматических углеводородов варьирует от 1 до 66 мкг/г, но лишь в осадках материкового подножья у желобов концентрации ПАУ повышены.

В осадках устьевого взморья р. Лена образуются наиболее высокие концентрации тяжелых металлов. Содержание свинца может повышаться до 25.0 мкг/г сухого осадка; кадмия – до 2.1, меди – до 20.0, а цинка – до 220 мкг/г сухого осадка.

Концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях варьирует в диапазоне от следовой активности (МДА < 0.2 Бк/кг) до 5.7 Бк/кг сухой массы,  $^{90}\text{Sr}$  – от 0.1 до 1.7.

### **Выводы**

Современный уровень исследований не позволяет дифференцированно с балансовой точностью оценить роль трансграничного переноса и местных источников загрязняющих веществ в окраинных бассейнах Российской Арктики. Можно отметить снижение объемов загрязняющих веществ, поступающих по глобальной системе морских течений в направлении с запада на восток. Роль речного стока наиболее значима в морях Карском и Лаптевых, тогда как

в Баренцевом море, напротив, значительна роль морских течений в транспорте загрязнителей извне. В него попадает больше техногенных ЗВ, чем в другие моря Российской Арктики. Концентрация антропогенных загрязнителей происходит на участках фронтальных зон, включая локальные прибрежные и эстуарные гидрофронты, в понижениях донного рельефа, заливах и губах, аккумулирующих материковые и коммунальные стоки. Очаги импактного загрязнения в акватории морей и связанные с этим экологические риски определяются развитием хозяйственной деятельности на акватории и территории водосборных бассейнов.

Очевидна важная роль атмосферных выпадений как источника тяжелых металлов, стойких хлорорганических соединений, ПАУ. Максимальное поступление поллютантов в воздушную среду морей от региональных эмитентов происходит в зимний период. Развитие хозяйственной деятельности на акваториях и в водосборных бассейнах морей диктует необходимость расширения исследований экологического статуса арктических водоемов, мониторинга антропогенных и природных воздействий на экосистемы в изменяющихся климатических условиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ильин Г.В., Голубева Н.И. Антропогенные нагрузки и риски химического загрязнения морской среды в Арктике // Морские экосистемы и сообщества в условиях современных климатических изменений. СПб.: Реноме, 2014. С. 50–76.
2. Многолетняя динамика радиоактивного загрязнения Баренцево-Карского региона (1960-2013 гг.) / Г.Г. Матишов, Д.Г. Матишов, И.С. Усягина, Н.Е. Касаткина // Докл. РАН. 2014. Т. 458, № 4. С. 473–479.
3. Усягина И.С. Распределение и пути миграций искусственных радионуклидов в экосистеме Баренцева моря: автореф. дис. ... геогр. наук, специальность 25.00.28. Мурманск. 22 с.
4. Ильин Г.В. Распространение загрязняющих веществ в шельфовых морях Российской Арктики // Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. М.: ГЕОС, 2009. Вып. 1. С. 124–163.
5. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2002 г. СПб.: Гидрометеоздат, 2005. С. 126.
6. Жилин А.Ю., Плотичина Н.Ф. Алифатические и полициклические ароматические углеводороды в донных осадках Медвежинско-Шпицбергенского района Баренцева моря // Проблемы морской палеоэкологии и биогеографии в эпоху глобальных изменений. Комплексные исследования природы архипелага Шпицберген. М.: ГЕОС, 2009. Вып. 9. С. 248-256.
7. Перечень рыбохозяйственных нормативов: предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М.: Изд. ВНИРО, 1999. 305 с.
8. Klassifisering av miljøkvalitet i fjorder og kystfarvann. Veiledning / J. Molvaer, J. Knutsen, J. Magnusson, B. Rygg, J. Skei, J. Serensen // SFT Veiledning. 1997. Vol. 97, № 3. 36 p. (in Norwegian).
9. Искусственные радионуклиды в экосистеме / Д.Г. Матишов, Н.Е. Касаткина, И.С. Усягина, Е.В. Павельская // Кольский залив: освоение и рациональное природопользование. М.: Наука, 2009. С. 313–332.
10. Немировская И.А. Углеводороды в экосистеме Белого моря // Океанология. 2005. Т. 45, № 5. С. 678–688.

#### Сведения об авторах

*Ильин Геннадий Васильевич* – к.г.н., зав. лабораторией океанографии и радиоэкологии Мурманского морского биологического института КНЦ РАН; e-mail: ilyin@mmbi.info

*Усягина Ирина Сергеевна* – к.г.н., старший научный сотрудник лаборатории океанографии и радиоэкологии Мурманского морского биологического института КНЦ РАН; e-mail: usjagina@mmbi.info

*Касаткина Надежда Евгеньевна* – к.х.н., ученый секретарь Мурманского морского биологического института КНЦ РАН; e-mail: kasatkina@mmbi.info