

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ НЕФТЯНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ В РАЗНЫХ РАЙОНАХ БЕЛОГО МОРЯ¹

© 2013 г. А. В. Леонов, О. В. Чичерина

Институт океанологии РАН

117997 Москва, Нахимовский просп., 36

E-mail: leonov@ocean.ru

Поступила в редакцию 28.11.2010 г.

Проведен анализ имеющихся наблюдений за изменениями концентраций нефтяных углеводородов в притоках Белого моря и его отдельных районах, и оценена роль отдельных внешних источников в загрязнении морской среды. На основе расчетов определено возможное суммарное поступление углеводородов из дополнительных потенциальных источников – внутренних природных (продукция микроорганизмами) и внешних антропогенных (судоходство и морские перевозки), наиболее активных летом–осенью. Гидроэкологическая CNPSi-модель использована для воспроизведения процессов загрязнения девяти выделенных районов Белого моря нефтяными углеводородами и их последующей биodeградации в морской среде. Для расчетов внутригодовой динамики концентраций углеводородов использованы среднесезонные наблюдения за ежемесячными изменениями температуры, освещенности, прозрачности воды, данные по морфометрии районов моря (площади, средние глубины, объемы воды), а также по водообмену между выделенными районами (вычислены на гидродинамической модели). Для крупных заливов (Двинский, Кандалакшский) показано соответствие расчетных концентраций нефтяных углеводородов имеющимся оценкам (средние и максимальные концентрации). Охарактеризованы изменения в течение года концентраций нефтяных углеводородов, биомасс, показателей окислительной активности и биопродукции нефтеокисляющих бактерий. По расчетным внутренним потокам нефтяных углеводородов (поступления из разных источников, перенос по горизонтали, биотрансформация) составлены их годовые балансы для отдельных районов и моря в целом, свидетельствующие о сбалансированности их потоков и общей невязки баланса для отдельных районов в пределах 0.3–4.1%.

Ключевые слова: моделирование внутригодовой динамики концентраций НУ по девяти взаимосвязанным районам Белого моря, активность НУ-окисляющих бактерий (удельная скорость роста, потребление НУ и O₂, биопродукция), модули нагрузки районов моря по НУ, балансы НУ для отдельных районов и всего моря.

DOI: 10.7868/S0321059613010069

Наблюдения за состоянием загрязнения морских водоемов проводит преимущественно Гидрометслужба, представляя в специальных сборниках полученные данные в виде “средних” и “максимальных” концентраций загрязняющих веществ (ЗВ), включая содержание нефти и нефтепродуктов, или нефтяных углеводородов (далее для краткости все обозначены НУ), в отдельных акваториях морей России.

Следует отметить некоторую условность представляемых в этих ежегодниках средних и максимальных концентраций ЗВ для морских акваторий. Как правило, количество выполняемых съе-

мок по отдельным акваториям морей России в последние годы составляет ~2–4 за год. Сроки наблюдений за состоянием акваторий морей, проводимые более 40 лет, достаточно случайны (как правило, они меняются год от года). При необходимом и осуществляемом совершенствовании методов определения концентраций ЗВ выполненные ранее наблюдения по точности становятся несопоставимыми с новыми и, следовательно, непригодными для дальнейшего применения. Оцениваемые по малому количеству съезок (и самих определений) средние и максимальные концентрации отдельных ингредиентов в морской воде по сути таковыми являются только для данной серии наблюдений, но не для изучаемого водного объекта по ряду причин. Во-первых, нет

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 08-05-00094, 09-05-13510-офи_ц).

ясности в том, какие периоды времени они характеризуют. Во-вторых, эти наблюдения абсолютно случайны по срокам и количеству. В-третьих, с первых лет наблюдений они дают лишь ориентировочное представление о порядках концентраций ЗВ в морских водах. Поэтому представляемая в ежегодниках качества морских вод информация не может претендовать на более широкое использование в научных целях. Несмотря на многие годы выполнения исследований, по этим данным нельзя оценить важнейшую характеристику химических показателей — их сезонную динамику, и поэтому нельзя полноценно использовать эти накопленные данные для изучения в естественных условиях особенностей трансформации и динамики ЗВ в морских экосистемах.

Ценность этих наблюдений, информации по качеству морских вод и состоянию морских акваторий была бы выше, если бы в указанных сборниках приводились все первичные данные о выполняемых наблюдениях, в частности о времени наблюдений (год, месяц, день, время суток), колебаниях концентраций ЗВ в отдельных съемках на разных участках изучаемых морей и другие полезные сведения (например, о подразделении НУ на классы углеводородов (УВ)). Тогда было бы возможно выполнять анализ и проводить обобщение имеющейся накопленной информации в зависимости от ставящихся конкретных задач исследований. Аналитическое определение концентраций НУ (как правило, на основе ИК-метода) подразумевает оценку суммарного содержания растворимых (в гексане или четыреххлористом углеводе) неполярных и малополярных УВ сырой нефти и продуктов ее переработки — алифатических УВ (АУВ) и полициклических ароматических УВ (ПАУ), на которые приходится в сумме 70–90% НУ [17, 19].

Имеющиеся в ежегодниках качества морских вод данные наблюдений за изменением концентраций НУ по Белому морю и его притокам были частично обобщены и включены в обзор [30]. Отмечен разброс значений оцененных концентраций НУ в морской среде, в целом усугубляемый разнообразием применяемых методов отбора проб, их первичной обработки, использованием многочисленных схем экстракции УВ с широким набором органических растворителей [34]. Сопоставление разных методов [17] показывает, что данные наиболее часто применяемых на практике методов ИК-спектрофотометрии и флуоресцентного анализа могут отличаться в ≥ 100 раз из-за различий в селективности этих методов.

Для вод Белого моря, в частности крупных его заливов (Кандалакшский, Онежский, Двинский и Мезенский), НУ признаны важнейшими среди других ЗВ [28]. Состав нефтяных УВ в различных морских объектах Белого моря формируется из разных источников — аллохтонных (включают НУ антропогенного происхождения, поступают с суши в морскую среду с разным загрязнением) и автохтонных (природных биогенных, которые синтезируются в море). Среди аллохтонных источников, которые обеспечивают загрязнение по НУ водной среды арктических морей, в частности Белого моря, выделены три основных [25, 27, 31]

– речной сток, в котором аккумулированы запасы НУ при их выносах с разных обширных водосборных территорий;

– сбрасываемые непосредственно в морскую среду разнообразные сточные воды (промышленные, городские, судовые, стоки портовых сооружений, терминалов, поселков и др.);

– атмосферный перенос и выпадение из аэрозолей на морскую поверхность НУ (в форме АУВ и ПАУ) в районах, где происходит накопление продуктов неполного сгорания сырья, содержащего УВ (НУ, уголь и другие виды ископаемого топлива).

Относительный вклад этих аллохтонных источников и суммарное поступление НУ в воды арктических морей и на их акватории, в частности в Белое море, различается [34]. Однако ошибочно связывать аномалии наблюдаемых концентраций нефтяных УВ, как это неоднократно отмечалось для Белого моря, только с антропогенным воздействием и использовать для этого термин НУ [33]. В компонентах среды (вода, снег, лед, биота) Белого моря содержание НУ, состав и распределение УВ значительно различались в зависимости от района моря [22]. Влияние антропогенных УВ локально и установлено, в основном, в устьевых зонах рек, в верховьях заливов, в районах портов и судоходных трасс. На остальных акваториях моря во всех исследованных объектах доминируют природные соединения, так как антропогенные УВ задерживаются на границе река–море [17, 20, 32]. Автохтонные биогенные (или смешанные нефте-автохтонные) вещества обнаруживаются в прибрежных зонах, так как нефтяные УВ способствуют интенсификации биогенных процессов [32].

В современных условиях особенно актуальны такие исследования загрязнения по НУ арктических морей России (включая Белое море), которые связаны с оценками изменения региональных их концентраций и потоков в морской среде, а также в целом с возможностью составления ба-

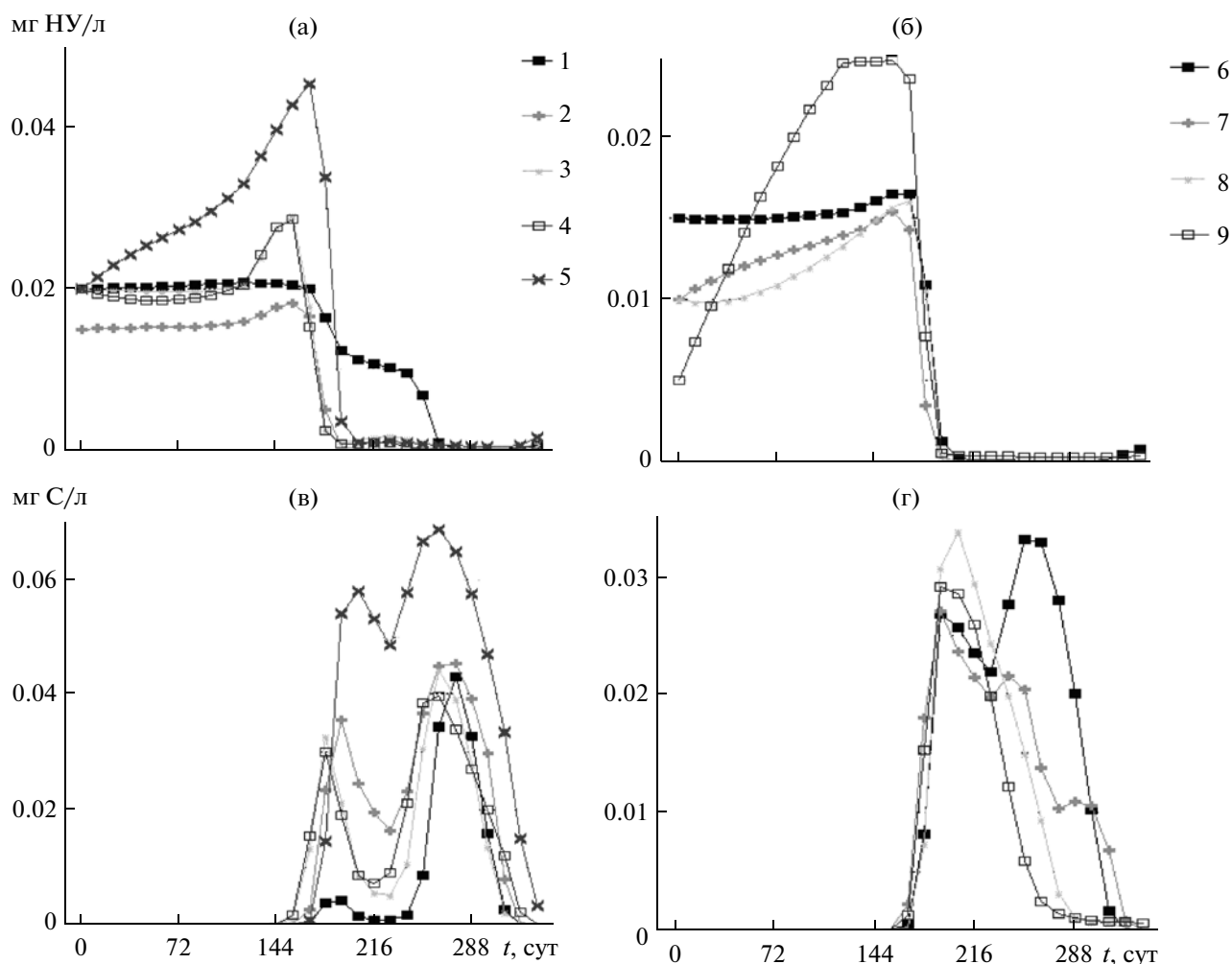


Рис. 1. Внутригодовая динамика расчетных концентраций NH_4 (а, б) и биомасс бактерий B_2 (в, г) в поверхностном слое в районах 1–9 Белого моря с учетом поступления NH_4 с речным стоком и со сточными водами. Здесь и на рис. 2 и 3: а, в – данные для заливов (1 – мелководная часть Кандалакшского зал., 2 – Онежский, 3 – Двинский, 4 – Мезенский заливы, 9 – губа Чупа); б, г – для районов открытой части моря (5 – район Соловецких о-вов, 6 – Бассейн вместе с глубоководной частью Кандалакшского зал., 7 – Горло, 8 – Воронка).

ланса NH_4 для моря и его отдельных акваторий. Для Арктического бассейна и его отдельных морей до сих пор остаются фактически не исследованными указанные проблемы распределения и перераспределения NH_4 (между сушей и морем) и их выноса в море с речными водами [34]. Исследованию указанных проблем для Белого моря было уделено основное внимание в данной работе, выполненной с помощью CNPSi-модели на основе принципов системного анализа и математического моделирования [6].

ЗАДАННОЕ В РАСЧЕТАХ НА МОДЕЛИ ПОСТУПЛЕНИЕ NH_4 В ВОДЫ РАЗНЫХ РАЙОНОВ БЕЛОГО МОРЯ

Расчеты на модели динамики концентраций NH_4 и биомасс NH_4 -окисляющих бактерий B_2 про-

ведены для районов 1–9 Белого моря (рис. 1 в [11, 30]: 1–4 – заливы Кандалакшский, Онежский, Двинский, Мезенский; 5–8 – открытые участки моря – район Соловецких о-вов, глубоководная часть моря – Бассейн вместе с глубоководной частью Кандалакшского зал. (далее для краткости глубоководный Бассейн вместе с глубоководной частью Кандалакшского зал. называется Бассейном), Горло и Воронка; 9 – губа Чупа). В расчетах учитывались данные для районов 1–9: морфометрические показатели, оцененные по среднегодовым значениям температуры, освещенности и прозрачности воды, фотопериода, данным по водному режиму и другим показателям; а также расчетные параметры водообмена между акваториями Белого и граничащего с ним Баренцева морей [10–12]. Типичными внешними

источниками загрязнения поверхностных вод Белого моря являются речной сток, поступающие в Белое море баренцевоморские воды, а также сточные воды, сбрасываемые в разные акватории моря и загрязненные НУ. Перераспределение НУ по акваториям моря обеспечивается обменными процессами переноса веществ течениями через границы районов моря. Количественно роль указанных источников в нагрузке по НУ на акватории Белого моря должна быть задана в расчетах с максимально возможной детальностью (для данного этапа изученности проблемы), чтобы воспроизвести особенности распределения концентраций НУ и определить их баланс как для отдельных акваторий, так и для Белого моря в целом.

Устьевые участки ряда притоков Белого моря – крупные транспортно-промышленные центры (Архангельск, Северодвинск, Новодвинск). Здесь происходит слияние важнейших речных и морских судоходных трасс, сконцентрированы такие отрасли промышленности, как лесопромышленная, целлюлозно-бумажная, судостроительная и ремонтная, рыболовная. Высокая концентрация промышленных объектов в устьевой зоне притоков формирует значительную антропогенную нагрузку на эстуарную зону. На примере Архангельска видно, что из-за сброса в реки сточных промышленных вод предприятий снижается качество воды на их дельтовом участке [16].

Для учета влияния на экосистему Белого моря речного стока, как источника загрязнения НУ морской среды, следует использовать меняющиеся ежемесячные (или сезонные) концентрации НУ в речных водах. Однако по результатам анализа литературных данных удалось выявить изменения концентраций НУ в разные месяцы только в водах р. Северная Двина, которые поступают в Двинский зал. [30]. Для других притоков моря ежемесячные данные в соответствующих литературных источниках не представлены. В [24] приведены диапазоны регистрируемых концентраций НУ в реках-притоках Белого моря и их среднего выноса с речным стоком в Белое море. Для рек Нива, Кереть, Кемь, Онега, Северная Двина и Мезень регистрируемые диапазоны концентраций НУ составляют соответственно: ниже предела обнаружения (НПО)–6.900, НПО–0.620, НПО–1.120, НПО–2.300, НПО–0.519 и НПО–1.110 мг НУ/л. Диапазоны среднего выноса НУ в Белое море со стоком указанных рек составляют соответственно: НПО–1.510, 0.013–0.188, 0.224–4.296, НПО–8.316, 1.180–9.780 и 0.213–14.300 тыс. т НУ/год [24].

Годовой вынос веществ реками в море вычисляется перемножением среднемесячных значений концентраций веществ на расход воды и последующим сложением полученных ежемесячных значений выноса веществ. В 1960-е гг. годовой вынос реками в Белое море биогенных веществ (БВ) оценивался по немногочисленным измерениям концентраций БВ в течение года в реках и по достаточно точным ежемесячным оценкам значений расходов воды рек-притоков. Оцениваемые изменения в течение года выноса БВ в Белое море определялись преимущественно сезонными колебаниями расходов воды в исследованных реках [14].

В настоящее время при недостатке измерений концентраций НУ в речных и баренцевоморских водах, поступающих в Белое море, годовой вынос НУ с этими водами в Белое море может быть оценен точно так, как ранее оценивался годовой вынос БВ реками в море. Для этого в расчетах на модели использовались имеющиеся фрагментарные измерения (или принятые средние значения) концентраций НУ в указанных водных объектах и их ежемесячные расходы воды. При крайне малом количестве измеренных концентраций НУ в реках-притоках имеющиеся фрагментарные данные уточнялись в серии численных экспериментов, чтобы предварительно оцененный вынос НУ в море был близок к их средним значениям, приведенным в [24].

Оцененные с помощью численных экспериментов средние концентрации НУ в реках-притоках Белого моря и в баренцевоморских водах, а также среднемноголетние значения расходов воды, используемые в расчетах на модели, приведены в табл. 1. Здесь только для рек Северная Двина и Онега использованы найденные в литературе меняющиеся по месяцам значения концентраций НУ в речном стоке, поступающем в Белое море [30].

Предварительный анализ данных табл. 1 показал, что со стоком рек Северная Двина, Онега, Мезень, Нива, Кемь и Кереть в районы Белого моря поступает соответственно 11.766, 0.691, 1.127, 0.424, 2.048, 0.094 тыс. т НУ/год. Эти значения близки или соответствуют диапазонам, приведенным для указанных рек в [24]. Расчеты показывают, что каждый приток Белого моря в зависимости от значений расходов воды имеет свои характерные наибольшие и наименьшие значения выноса НУ в соответствующие районы моря.

Так, наибольшее поступление НУ в Белое море со стоком р. Северная Двина приходится на май–июль (4.096–1.191 тыс. т НУ/мес.) и октябрь

Таблица 1. Принятые для расчетов средние концентрации НУ, мг/л, в разные месяцы в водах основных притоков Белого моря и поступающих в него вод Баренцева моря (в скобках – значения расходов воды, км³/мес.; здесь и в табл. 3 числитель – диапазон наблюдаемыми минимальными и максимальными концентрациями НУ для разных месяцев, знаменатель – среднее содержание НУ [10–12, 30]; здесь и в табл. 5 прочерк – отсутствие данных)

Река/Море	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
р. Северная Двина	– 0.119 (2.73)	– 0.119 (1.97)	0.040–0.240 0.147 (1.94)	0.012–0.153 0.093 (6.24)	0.0–0.320 0.111 (37.00)	0.012–0.192 0.093 (18.60)	0.051–0.197 0.152 (7.82)	0.028–0.164 0.104 (5.87)	– 0.130 (6.09)	0.050–0.440 0.156 (7.64)	0.047–0.119 0.083 (6.14)	0.020–0.110 0.070 (3.72)
р. Онега	0.043 (0.43)	0.045 (0.33)	0.046 (0.34)	0.047 (1.19)	0.050 (5.25)	0.047 (2.21)	0.044 (1.15)	0.040 (0.84)	0.040 (0.96)	0.040 (1.25)	0.042 (0.93)	0.043 (0.19)
р. Мезень	0.055 (0.45)	0.055 (0.35)	0.055 (0.36)	0.055 (0.93)	0.055 (7.12)	0.055 (3.81)	0.055 (1.53)	0.055 (1.10)	0.055 (1.29)	0.055 (1.73)	0.055 (1.16)	0.055 (0.66)
р. Нива	0.100 (0.43)	0.100 (0.27)	0.100 (0.41)	0.100 (0.40)	0.100 (0.38)	0.100 (0.26)	0.100 (0.29)	0.100 (0.28)	0.100 (0.38)	0.100 (0.28)	0.100 (0.43)	0.100 (0.43)
р. Кемь	0.293 (0.36)	0.293 (0.31)	0.293 (0.33)	0.293 (0.33)	0.293 (0.83)	0.293 (0.82)	0.293 (0.70)	0.293 (0.65)	0.293 (0.71)	0.293 (0.73)	0.293 (0.80)	0.293 (0.42)
р. Кереть	0.130 (0.43)	0.130 (0.33)	0.130 (0.34)	0.130 (1.19)	0.130 (5.25)	0.130 (2.21)	0.130 (1.15)	0.130 (0.84)	0.130 (0.96)	0.130 (1.25)	0.130 (0.93)	0.130 (0.19)
Баренцево море	0.100 (83.15)	0.100 (82.98)	0.100 (84.49)	0.100 (74.32)	0.100 (35.61)	0.100 (53.01)	0.100 (71.89)	0.100 (84.60)	0.100 (71.09)	0.100 (80.13)	0.100 (77.21)	0.100 (88.51)

(1.192), р. Онега – на май (0.263), июнь (0.104) и октябрь (0.050), р. Мезень – на май–июнь (0.392–0.210), сентябрь (0.071) и октябрь (0.095), р. Нивы – на январь, март–апрель и ноябрь–декабрь (0.040–0.043), р. Кемь – на май–июнь (0.243–0.240), октябрь (0.214) и ноябрь (0.234), р. Кереть – на май (0.017) и июнь (0.013 тыс. т НУ/мес.).

Наименьшее поступление НУ в море со стоком рек Северная Двина, Онега и Мезень происходит в зимние месяцы (январь–март и декабрь): 0.234–0.325, 0.008–0.019 и 0.019–0.036 тыс. т НУ/мес. соответственно. Со стоком р. Нива наименьшее количество НУ поступает в море в феврале, июне–августе и октябре (0.026–0.029), р. Кемь – в январе–апреле (0.091–0.106) и декабре (0.123), а р. Кереть – в январе–апреле (0.005–0.004) и ноябре–декабре (0.007 тыс. т НУ/мес.).

Вынос НУ из Баренцева моря в Белое повышен в январе–марте (8.298–8.449), августе (8.460), октябре (8.013) и декабре (8.851 тыс. т НУ/мес.), а наименьший он в мае (3.561) и июне (5.301 тыс. т НУ/мес.).

Таким образом, предварительные расчеты показали, что водообмен на границах река–море в сравнении с водообменом между Белым и Баренцевым морями (табл. 1) существенно ниже и, соответственно, нагрузка по НУ на акватории Белого моря в течение года в целом ниже в зонах впадения рек и выше в районе Воронка, куда баренцевоморские воды приносят значительное количество НУ. Всего за год из Баренцева в Белое море поступает 88.699 тыс. т НУ, что в 5.5 раз выше, чем поступление НУ в море с учитываемыми основными реками–притоками. Здесь важно то, что роль Баренцева моря в нагрузке вод Белого моря по НУ ранее практически никем во внимание не принималась и количественно не оценивалась.

По имеющейся информации для 2004–2006 гг., объемы сточных вод, сбрасываемых в отдельные крупные заливы Белого моря, менялись в пределах 265661.2–269761.1 (среднее 267445.5) тыс. м³, из них сбрасывается в среднем 94.8% в Двинский зал, 3.7% – в Кандалакшский зал. и 1.5% – в Онежский зал. Среднегодовое поступление НУ в указанные заливы Белого моря со сточными водами, оцененное за 1998–2006 гг., составило 15.778 т НУ [30]. Таким образом, с учетом сбрасываемых объемов сточных вод в Двинский, Кандалакшский и Онежский заливы с этими водами поступало соответственно в среднем 14.957, 0.584 и 0.237 т НУ. В пересчете этих значений на объемы вод заливов (71.2, 136.5 и 450 км³ соответственно для Кандалакшского, Онежского и Двинского [10–12]) получим, что поступление НУ со сточными водами

в указанные заливы происходит соответственно со средними скоростями 4.557×10^{-8} , 9.646×10^{-9} и 1.85×10^{-7} мг НУ/(л сут).

Вычисления с помощью модели проводились для однослойной системы с шагом 0.05 сут методом Рунге–Кутты–4 для календарного года (с 1 января по 31 декабря). Концентрации НУ в воде в районах 1–9 на начало года предполагались в первой серии расчетов равными соответственно 0.02, 0.015, 0.02, 0.02, 0.02, 0.015, 0.01, 0.01 и 0.005 мг/л (все <ПДК) [30]. Выполненные предварительные расчеты с учетом нагрузки по НУ на отдельные заливы моря, обеспечиваемой речным стоком, сбрасываемыми сточными водами и выносом НУ в Белое море из Баренцева моря показали, что для большей части года эта принятая нагрузка по НУ недостаточна для воспроизведения значений концентраций НУ, которые регистрируются в отдельных съемках: расчетные концентрации НУ в сравнении с немногочисленными наблюдениями оказываются существенно ниже для летнего и осеннего периодов (рис. 1а–1г). Например, в водах кутовой части Кандалакшского зал. содержание НУ в августе оценивалось равным 0.100 мг НУ/л, и при таких концентрациях НУ скорости потребления НУ бактериями *B2* на разных глубинах были в пределах 42.4–89.5 нг НУ/(л ч) (или 1.018–2.148 мкг НУ/(л сут)) [2]. Для этой акватории полученные при указанной выше нагрузке по НУ расчетные значения их концентраций и скорости потребления бактериями *B2* в августе составляли соответственно 9.2–10.8 мкг НУ/л и 0.0377 мкг НУ/(л сут). Как видно, расчетные концентрации НУ и скорости их потребления бактериями *B2*, в отличие от наблюдаемых значений этих параметров, сильно занижены: концентрации НУ в ~10 раз, а скорости их потребления в среднем в ~40 раз.

В обзоре загрязнения акваторий Белого моря [30] отмечалось, что в сезонной изменчивости концентраций НУ в поверхностных и придонных водах в некоторых акваториях моря обнаруживается два их максимума (весенний и осенний) и пониженное содержание НУ летом. Предполагалось, что подобный тип сезонной изменчивости концентраций НУ связан со структурой квазистационарных течений в Белом море, в частности течений Двинского (следует из вершины Двинского зал. вдоль Зимнего берега в Горло) и Беломорского (берет начало от м. Зимнегорского, следует вдоль Зимнего берега до м. Инцы в Горло, далее отклоняется к о. Сосновец и затем следует на север в район Воронка) [4].

Таким образом, учтенное в первом варианте расчетов поступление НУ в Белое море из внеш-

них источников (с речным стоком, со сточными водами и из Баренцева моря) и их перераспределение течениями по акваториям моря не воспроизводит того сезонного хода концентраций НУ, которое можно считать характерным для экосистемы моря во вторую половину года. Без увеличения нагрузки по НУ (именно для второй половины года) воспроизвести в расчетах наблюдаемые концентрации НУ и их характерную годовую динамику практически невозможно.

Необходимо, однако, определить: насколько реалистично в последующих расчетах увеличивать нагрузку по НУ на акватории Белого моря, и какие существующие источники НУ (внешние или внутренние) при этом могут быть приняты во внимание? Обратимся к литературным данным, чтобы ответить на эти вопросы. Годовое поступление в Мировой океан АУВ, на которые приходится 70–90% НУ, по современным оценкам, составляет 18.4 млн т, при этом 73.6, 22.8, 10.9 и 6.2% обеспечивается соответственно синтезом морскими организмами, выносом из терригенных источников, нефтяным загрязнением и поступлением из атмосферы [17]. Известно, что до настоящего времени подобные оценки для арктических морей отсутствуют (нет надежных данных даже по выносу НУ в моря Арктики с речным стоком), а косвенные данные (высокая биопродуктивность вод Баренцева, Печорского и Белого морей, а также содержание и распределение концентраций АУВ в водах арктических морей [21]) свидетельствуют в основном о природном (или биогенном) происхождении основной (>70%) массы АУВ в морях Арктики [34].

Природные источники НУ в арктических морях (биосинтез морской биотой, выходы на морском дне) доминируют по отношению к антропогенному поступлению АУВ и ПАУ. Подавляющая часть арктических морей России (за исключением локальных импактных районов) находится в области природного фонового содержания НУ. Существование этого изменчивого и до сих пор слабо изученного геохимического фона НУ существенно осложняет интерпретацию результатов мониторинговых наблюдений за состоянием нефтяного загрязнения морских регионов Арктики [34].

Следует отметить, что для арктических морей практически не раскрыта роль такого источника загрязнения морской среды, как морской транспорт/судоходство: на него приходится 33% общего вклада поступления НУ из внешних источников [29]. Для арктических морей судоходство как источник нефтяного загрязнения может представ-

лять определенную опасность на акваториях, прилегающих к портам и трассам интенсивных морских перевозок (например, Кольский и Кандакшский заливы). География экспортной транспортировки НУ (включая сырую нефть и нефтепродукты) в последние годы интенсивно расширяется при освоении маршрутов, проложенных в арктических морях (в первую очередь в Баренцевом, Белом и Карском) [29]. Морские перевозки нефти осуществляются не только на экспорт, но и по внутренним трассам в Арктике. На действующих терминалах перегружается и перевозится морским транспортом ~12 млн т нефти и нефтепродуктов [1]. Основная часть нефти и жидкого топлива поставляется в порты для перевалки и дальнейшей транспортировки из внутренних регионов России [34]. Согласно прогнозам [1], в 2010 г. объемы перевозок нефти по морским трассам в Арктике должны были составить 40 млн т. Поступление нефти в результате сброса льяльных вод с судов по трассе Северного морского пути оценивалось в 50–200 т за одну навигацию [5], а по другим оценкам [35], вклад этого источника <1.5 т/год [34]. Однако уже в настоящее время для Белого моря судоходство служит весьма актуальным источником загрязнения морской среды в связи с расширением масштабов транспортировки и перевалки нефти и нефтепродуктов по акваториям моря. Этому способствуют имеющиеся крупные терминалы (порт Витино в Кандакшском зал., нефтебаза в порту Архангельск), через которые осуществляется интенсивный грузооборот и перевалка нефти, ее продуктов, топлива (дизельное, мазут), газа и газоконденсата. В порту Архангельск в 2003 г. создана первая очередь НУ-терминала (мощность 2.2–2.5 млн т/год) для танкеров водоизмещением до 20 тыс т. Объем перевалки здесь газоконденсата ~20 тыс. т/мес., ожидается довести его в ближайшие годы до 1.2–1.5 млн т/год. В стадии строительства с 2003 г. находится Северо-Двинский терминал для экспорта НУ в объеме до 2.5 млн т/год и обслуживания танкеров водоизмещением 40 тыс. т [30].

Именно для поверхностных вод Кандакшского зал. и устьевой зоны Северной Двины в Белом море уже установлены признаки, характерные для нефтяного загрязнения морской среды [18]. После введения в строй в перспективе строящихся терминалов (Северо-Двинского в порту Архангельск и Беломоро-Балтийского в порту Онега) и связанного с этим расширения судоходства нагрузка по НУ на экосистему Белого моря только возрастет [30]. Судоходство на Белом море начинается весной, летом–осенью оно наиболее

активно, в конце осени его интенсивность сокращается, а зимой отсутствует в связи с ледоставом.

Таким образом, для Белого моря существенными потенциальными источниками дополнительного поступления НУ в морскую среду могут служить их образование микроорганизмами (природное или биогенное по генезису) и нагрузка за счет активизации морского транспорта и судоходства в целом. С большой вероятностью можно предположить, что наиболее существенная роль этих источников именно в летне-осенний период, когда продукция гидробионтов максимальна и наиболее активны судоходные транспортные перевозки по морю.

Предполагалось, что влияние указанных дополнительных источников загрязнения морской среды можно в расчетах принять идентичными для разных районов Белого моря. Значения суммарных скоростей поступления НУ за счет потенциального влияния указанных дополнительных источников оценивались в серии расчетов на CNPSi-модели. В результате были получены следующие значения суммарных скоростей поступления НУ на единицу объема вод в районах 1–9 Белого моря: для мая – 7.00×10^{-4} , июня–июля – 1.25×10^{-3} , августа–октября – 1.50×10^{-3} и ноября – 5.00×10^{-4} мг НУ/(л сут). Из сделанных предположений следует, что значения суммарных скоростей поступления НУ из дополнительных источников в январе–апреле и декабре существенно ниже, чем в указанные месяцы, поэтому их влиянием на содержание НУ в морской среде в зимние месяцы можно в расчетах пренебречь.

АНАЛИЗ РАСЧЕТНОЙ ДИНАМИКИ КОНЦЕНТРАЦИЙ НУ И БИОМАСС БАКТЕРИЙ B_2 В РАЗНЫХ РАЙОНАХ БЕЛОГО МОРЯ

В морской воде трансформация НУ осуществляется в результате сложных и разнообразных процессов, главные из них – физический перенос, растворение и эмульгирование, окисление, деструкция, седиментация и биоседиментация, микробное разложение (биodeградация). Физический перенос происходит на всех этапах присутствия НУ в морской среде, а биodeградация завершает разложение растворенной (наиболее долгоживущей) фракции НУ в морской среде [17]. В проведенном исследовании, как и в ранее выполненных расчетах [7–9, 13], учитывается только растворенная в водной среде фракция НУ, трансформация которой осуществляется за счет процессов деградации (или потребления) НУ-окисляющими бактериями B_2 . При переносе вод

течениями происходит перераспределение концентраций растворенной в воде фракции НУ и изменение (возрастание или снижение) ее содержания в водной среде. Эти основные процессы учитывались при моделировании деградации НУ в разных районах Белого моря на CNPSi-модели [6].

В выполненных повторных расчетах было учтено поступление НУ в морскую среду из внешних источников (с речным стоком, сточными водами и водами из Баренцева моря), а также оцененное по результатам проведенных численных экспериментов поступление НУ в период май–ноябрь из дополнительных источников, которое принималось на единицу объема вод одинаковым для разных районов Белого моря.

Содержание НУ в воде на начало года в районах 1–9 принималось таким же, как и для первой серии расчетов. Изменения расчетных значений концентраций НУ и биомасс B_2 в разных районах Белого моря с учетом дополнительной нагрузки по НУ на экосистему моря показано на рис. 2а–2г.

Далее проведем анализ изменения расчетных концентраций НУ и биомасс бактерий B_2 в разных районах моря. Подобный анализ внутригодовых изменений указанных параметров выполнен для экосистемы Белого моря впервые и поэтому сделан с достаточной детальностью, так как по имеющимся немногочисленным наблюдениям выполнить подобный анализ не представляется возможным. Условия развития биомасс B_2 в районах 1–9 охарактеризуем оцененными значениями удельной скорости их роста τ_{B_2} (рис. 3). Отметим, что диапазоны значений τ_{B_2} 0–0.1, 0.1–0.2, 0.2–0.3 и >0.3 сут⁻¹ характеризуют соответственно низкую, среднюю, высокую и очень высокую окислительную активность микроорганизмов [15].

Динамика концентраций НУ в январе–апреле во всех районах моря не связана с активностью НУ-окисляющих бактерий B_2 (она очень низкая). Поэтому в эти месяцы содержание НУ в водной среде заливов Кандалакшский, Онежский, Двинский, Мезенский и губы Чупа постепенно возрастает, и это происходит с малыми скоростями (соответственно 6.858×10^{-6} , 7.050×10^{-6} , 4.616×10^{-6} , 4.750×10^{-6} и 1.091×10^{-4} мг НУ/(л сут)). В заливах Кандалакшский, Онежский, Двинский и Мезенский приведенные низкие скорости роста концентраций НУ в указанный период определяются практической сбалансированностью процессов поступления НУ из внешних источников и их последующим переносом в открытые районы моря. В губе Чупа в этот период скорости поступления НУ выше скоростей их переноса в открытую часть моря, поэтому общая скорость возрастания кон-

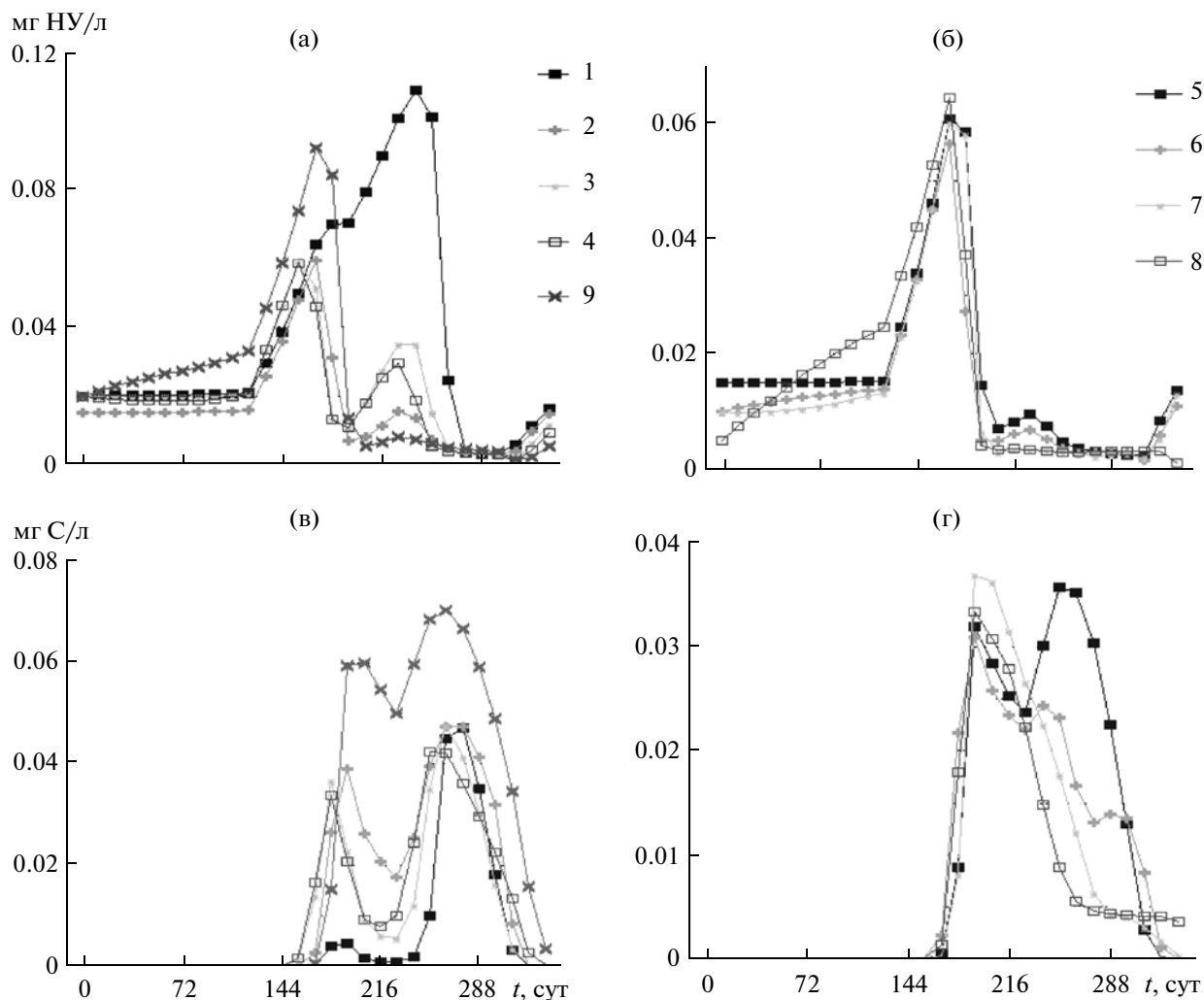


Рис. 2. Внутригодовая динамика расчетных концентраций НУ (а, б) и биомасс бактерий *B2* (в, г) в поверхностном слое в районах 1–9 Белого моря при учете дополнительной нагрузки по НУ на морскую экосистему.

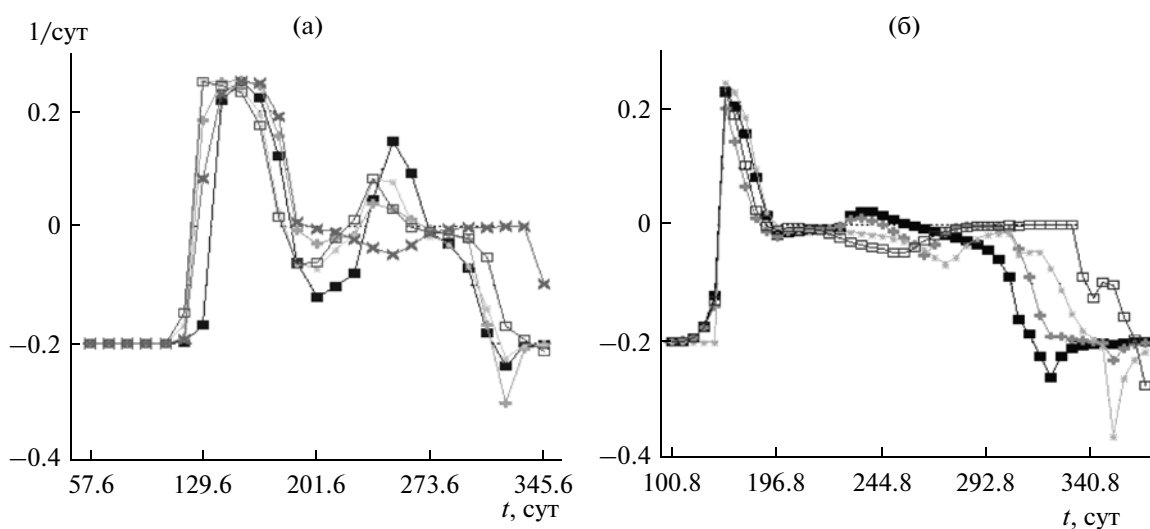


Рис. 3. Расчетная внутригодовая динамика удельной скорости роста биомассы бактерий *B2* в поверхностном слое в районах 1–9 Белого моря: а – заливы; б – открытая часть моря.

центраций НУ здесь выше, чем в других заливах моря.

С увеличением в мае поступления НУ в водную среду из дополнительных источников скорости возрастания концентраций НУ в заливах Кандакшский, Онежский, Двинский, Мезенский и губе Чупа выросли (до 8.578×10^{-4} , 9.049×10^{-4} , 1.008×10^{-3} , 1.024×10^{-3} и 1.199×10^{-3} мг НУ/(л сут) соответственно) и в указанных районах на 178, 168, 161, 159 и 173 сут соответственно отмечены промежуточные максимумы концентраций НУ: 0.0701, 0.0593, 0.0617, 0.0599 и 0.0964 мг/л (рис. 2а).

В последующий период с активизацией развития биомасс B_2 в водах Онежского, Двинского, Мезенского заливов и губы Чупа концентрации НУ уменьшились до 0.0066, 0.0094, 0.0099 и 0.0052 мг/л (соответственно на 195, 188, 188 и 207 сут). Снижение концентраций НУ в указанных районах происходило со скоростями 1.998×10^{-3} , 1.637×10^{-3} , 1.737×10^{-3} , 2.714×10^{-3} мг НУ/(л сут) соответственно (рис. 2а). Параллельно со снижением в этот период концентраций НУ в водах заливов возрастают значения биомасс бактерий B_2 , которые в Онежском, Двинском, Мезенском заливах и в губе Чупа достигли максимумов (0.0406, 0.0366, 0.0337 и 0.0619 мг С/л соответственно на 190, 180, 180 и 197 сут) (рис. 2в). Отметим, что концентрация НУ в морских организмах, зависящая от гидрофобных и липофильных свойств НУ, может на несколько порядков превосходить их концентрацию в водной среде [34].

Максимальные значения удельных скоростей роста биомассы бактерий B_2 в заливах Белого моря в весенний период – свидетельства их высокой окислительной активности ($\tau_{B_2} = 0.252$ сут $^{-1}$). В водах Кандакшского и Онежского заливов наибольшие значения τ_{B_2} приходятся на конец мая (на 149 сут), в водах Двинского и Мезенского заливов – на начало мая (соответственно на 130 и 125 сут), а в водах губы Чупа – на начало июня (на 159 сут) (рис. 3а).

Из анализа расчетных данных следует, что в мае условия развития бактерий B_2 в водах Кандакшского зал. менее благоприятны (из-за пониженной температуры воды и высокого водообмена с глубоководным Бассейном [10–12]), развитие биомассы происходит медленно и формирующийся к июлю промежуточный максимум биомассы бактерий B_2 (на 188 сут) получается низким (0.0058 мг С/л). Значения удельной скорости роста бактерий B_2 с начала июля до второй половины августа в этом районе моря остаются отрицательными: меняются в диапазоне $\tau_{B_2} = -0.006$...

-0.131 сут $^{-1}$ (наименьшее значение отмечено на 197 сут) (рис. 3а). Поэтому концентрация НУ в водной среде в Кандакшском зал. продолжает увеличиваться вплоть до начала сентября, достигая 0.1099 мг НУ/л на 245 сут (рис. 2а).

В водах других заливов в июле–августе содержание НУ после отмеченных выше промежуточных минимумов возрастает: в Онежском, Двинском, Мезенском заливах и в губе Чупа соответственно со скоростями 2.419×10^{-4} , 5.780×10^{-4} , 4.866×10^{-4} и 1.282×10^{-4} мг НУ/(л сут). При этом во второй половине августа в этих районах отмечены летние максимумы содержания НУ (все <ПДК) – соответственно 0.0158, 0.0371, 0.0297 и 0.0083 мг НУ/л в период 228–236 сут (рис. 2а).

Увеличение концентраций НУ в июле–августе стимулирует повторную активизацию в течение года развития биомасс бактерий B_2 и образование ими второго максимума, который в водах Кандакшского, Онежского, Двинского, Мезенского заливов и губы Чупа достигает соответственно 0.0505, 0.0485, 0.0475, 0.0439 мг С/л (все максимумы приходятся на сентябрь – соответственно на 269, 269, 264, 257 и 262 сут) (рис. 2в). При этом окислительная активность бактерий B_2 в разных заливах различна. В водах Кандакшского зал. бактерии B_2 характеризуются средней окислительной активностью (наибольшее значение $\tau_{B_2} = 0.152$ сут $^{-1}$ приходится на 252 сут), а в водах Онежского, Двинского и Мезенского заливов она в этот период низкая – наибольшие значения τ_{B_2} составляют соответственно 0.042, 0.097 и 0.084 сут $^{-1}$ (приходятся на 240, 243 и 238 сут). В водах губы Чупа значения τ_{B_2} в августе–октябре были отрицательны (наименьшее значение $\tau_{B_2} = -0.047$ сут $^{-1}$, отмечаемое на 252 сут) (рис. 3а).

Концентрации НУ с возрастанием биомассы бактерий B_2 в водах Кандакшского, Онежского, Двинского, Мезенского заливов и губы Чупа снижаются в сентябре соответственно со скоростью 2.346×10^{-3} , 1.764×10^{-4} , 4.887×10^{-4} , 3.506×10^{-4} и 8.360×10^{-5} мг НУ/(л сут). При этом содержание НУ в указанных районах снижается до 0.0030, 0.0027, 0.0008, 0.0011 и 0.0015 мг НУ/л (соответственно на 291, 308, 310, 310 и 312 сут). К концу года содержание НУ в воде заливов начинает возрастать при снижении активности и биомасс бактерий B_2 (рис. 2а, 2в). Значения τ_{B_2} в акваториях заливов с октября до конца года остаются отрицательными, наименьшие их значения в водах Кандакшского и Онежского заливов приходятся на 320 сут (соответственно τ_{B_2} равна -0.244 и -0.325 сут $^{-1}$), а в водах Двинского, Мезен-

ского заливов и губы Чупа — соответственно на 322, 351 и 376 сут ($\tau_{B2} = -0.225, -0.376$ и -0.276 сут⁻¹) (рис. 3а).

В открытых районах моря динамика концентраций НУ определяется в основном поступлением НУ из соседних заливов моря, а также из Баренцева моря в результате процессов водообмена. В сравнении с водами заливов, в открытых акваториях моря (Бассейн, Горло и Воронка) в январе—апреле скорости роста концентраций НУ выше и составляют соответственно 3.238×10^{-5} , 2.692×10^{-5} , 1.727×10^{-4} мг НУ/(л сут). Таким образом, в январе—апреле скорость поступления НУ в воды района Воронка из Баренцева моря выше за счет больших значений водообмена, чем в других акваториях моря. В районе Соловецких о-вов эта скорость роста составляет 2.550×10^{-6} мг НУ/(л сут), и она ниже скоростей, характеризующих районы заливов моря в этот период.

Концентрации НУ в водах в районах Соловецких о-вов, Бассейна, Горла и Воронки в мае в сравнении с заливами возрастают с меньшими скоростями, которые оценены равными 8.922×10^{-4} , 8.822×10^{-4} , 9.325×10^{-4} и 7.928×10^{-4} мг НУ/(л сут) соответственно. При этом концентрации НУ достигают в этих районах в июне промежуточных максимумов (0.0646, 0.0562, 0.0647 и 0.0645 мг/л соответственно на 176, 168, 176 и 171 сут) практически в те же сроки, что и в заливах.

Биомассы бактерий *B2* в мае—июле в водах районов Соловецких о-вов, Бассейна, Горла и Воронки возрастают и достигают своих максимальных значений — соответственно 0.0323, 0.0315, 0.0382 и 0.0333 мг С/л (в указанных районах на 195, 190, 197 и 192 сут). При сравнительно небольшом отличии в значениях наибольших биомасс *B2* их окислительная активность, судя по максимальным значениям удельных скоростей роста их биомасс, в указанных акваториях отличается: она низкая в водах Бассейна ($\tau_{B2} = 0.065$ сут⁻¹) и высокая в водах районов Соловецких о-вов, Горла и Воронки ($\tau_{B2} = 0.250$ – 0.252 сут⁻¹). Наибольшие значения τ_{B2} приходятся на 149, 168 и 159 сут соответственно в районах Соловецких о-вов, Горла и Воронки (рис. 3б).

Возрастание биомассы бактерий *B2* в июне—июле вызывает снижение концентраций НУ в водах районов Соловецких о-вов, Бассейна, Горла и Воронки соответственно со скоростями 1.846×10^{-3} , 1.792×10^{-3} , 1.719×10^{-3} , 1.502×10^{-3} мг НУ/(л сут) — до 0.0070, 0.0046, 0.0028 и 0.0032 мг НУ/л, которые отмечаются в указанных районах в июле (соответственно на 207, 197, 212 и 212 сут) (рис. 2б, 2г). При

этом значения τ_{B2} снижаются, и соответственно со 195, 190, 197 и 192 сут их значения в водах районов Соловецких о-вов, Бассейна, Горла и Воронки становятся на некоторое время отрицательными (рис. 3б).

В августе в водах районов Соловецких о-вов и Бассейна отмечается небольшой пик концентраций НУ — соответственно 0.0096 и 0.0067 мг НУ/л (на 228 и 226 сут) и происходит возрастание биомасс бактерий *B2* (соответственно до 0.036 и 0.025 мг С/л на 257 и 245 сут (рис. 2б, 2г). Этим периодам возрастания активности бактерий *B2* соответствуют повышенные значения τ_{B2} , свидетельствующие, однако, о низкой их окислительной активности в указанный период в рассматриваемых акваториях (0.025 и 0.012 сут⁻¹ соответственно на 238 и 233 сут) (рис. 3б).

В оставшийся до начала ноября период (до 308 сут) значения концентраций НУ в водах открытой части Белого моря снижаются до 0.001–0.003 мг НУ/л, а к концу года они начинают возрастать. Биомасса бактерий *B2* в водах районов Соловецких о-вов, Бассейна и Горла в целом до конца года снижается (рис. 2б, 2г). Также в этих районах снижается и окислительная активность *B2* — значения τ_{B2} остаются отрицательными до конца года при наименьших их значениях -0.261 , -0.231 и -0.361 сут⁻¹, отмечаемых в водах указанных акваторий соответственно на 320, 351 и 351 сут (рис. 3б).

В сравнении с районами Соловецких о-вов, Бассейна и Горла в водах Воронки биомасса бактерий *B2* в октябре—ноябре практически неизменна и составляет 0.004 мг С/л (рис. 2г). Значения τ_{B2} в этот период в водах Воронки выше, чем в других открытых районах моря, а с 312 по 334 сут они имели даже положительные значения (с максимумом 0.002 сут⁻¹ на 329 сут) (рис. 3б).

Сопоставим расчетные концентрации НУ, оцененные в этом исследовании по среднемноголетним значениям параметров водной среды, с имеющимися наблюдениями, выполненными в последние годы в Белом море (табл. 2). В 2002–2007 гг. средние и максимальные концентрации НУ в водах Двинского зал. составляли 0.01–0.06 и 0.04–0.19 мг НУ/л, а в водах Кандалакшского зал. — 0.01–0.04 и 0.03–0.11 мг НУ/л соответственно. Согласно расчетам в данном исследовании, в водах Двинского зал. средние за год и максимальные концентрации НУ составили 0.020 и 0.062 мг НУ/л, а в водах Кандалакшского зал. — 0.036 и 0.110 мг НУ/л соответственно. Таким образом, значения наблюдаемых и расчетных показателей достаточно близки.

Таблица 2. Содержание НУ в Кандалакшском и Двинском заливах Белого моря в 2002–2007 гг. (1 – концентрация, мг/л, 2 – доли ПДК) [3, 30]

Район моря	Содержание	2002 г.		2003 г.		2004 г.		2005 г.		2006 г.		2007 г.	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Кандалакшский зал.	Среднее	0.04	0.8	0.01	0.2	0.02	0.4	0.04	0.8	0.03	0.6	0.03	0.6
	Максимальное	0.11	2.2	0.03	0.6	0.04	0.8	0.05	1.0	0.06	1.2	0.19	3.8
Двинский зал.	Среднее	0.01	0.2	0.01	0.2	0.06	1.2	0.01*	0.2*	0.05	1.0	0.05	1.0
	Максимальное	0.04	0.8	0.08	1.6	0.07	1.4	0.02*	0.4*	0.17	3.4	0.08	1.6

* Наблюдения выполнялись на дельтовых участках рек.

Таблица 3. Концентрации НУ, мг/л, в водах Двинского зал., оцененные по наблюдениям в поверхностном и придонном слоях в разные годы в безледный период [4] в сравнении с расчетными концентрациями НУ, полученными в настоящем исследовании

Месяц	Поверхностный слой/Придонный слой					Расчетные концентрации	
	1978–1989 гг.	1986 г.	2001–2006 гг.	диапазон изменений	среднее	диапазон изменений	среднее
Май	0.057	0.032	0.088	0.032–0.088	0.059	0.023–0.054	0.038
	0.042	0.038	0.083	0.038–0.083	0.054		
Июнь	0.049	0.018	0.029	0.018–0.049	0.032	0.057–0.014	0.045
	0.049	0.050	0.022	0.022–0.050	0.040		
Июль	0.032	0.035	0.029	0.029–0.035	0.032	0.009–0.024	0.015
	0.043	0.035	0.022	0.022–0.043	0.033		
Август	0.040	0.028	0.029	0.028–0.040	0.032	0.026–0.037	0.033
	0.054	0.038	0.022	0.022–0.054	0.038		
Сентябрь	0.056	0.042	0.030	0.030–0.056	0.043	0.029–0.004	0.011
	0.056	0.085	0.037	0.037–0.085	0.059		
Октябрь	0.060	0.043	0.030	0.030–0.060	0.044	0.002–0.003	0.003
	0.054	0.052	0.037	0.037–0.054	0.048		
Ноябрь	0.048	0.057	0.030	0.048–0.057	0.045	0.001–0.011	0.005
	0.050	0.045	0.037	0.037–0.050	0.044		

Результаты другого сравнения имеющихся наблюдений в отдельные месяцы с полученными в данном исследовании расчетными концентрациями НУ для Двинского зал. приведены в табл. 3. Для мая–августа наблюдаемые и расчетные концентрации НУ достаточно близки по значениям, тогда как для сентября–ноября их отличия существенны: наблюдаемые значения концентраций НУ в 4–16 раз выше расчетных. Это служит очевидным свидетельством возможной недооценки нагрузки по НУ на морскую среду Двинского зал. в осенние месяцы. Относительно других акваторий сказать что-либо определенное трудно из-за отсутствия у авторов данных наблюдений в указанный период.

Выполненные сравнения наблюдений и расчетов показывают, насколько важна при моделировании динамики концентраций ЗВ информация, которая характеризует сезонные изменения концентраций ЗВ в морской среде. Сезонные колебания концентраций НУ формируются под влиянием как естественных процессов (речной сток, метеорологические, гидрологические, гидробиологические процессы), так и техногенных факторов (судоходство, сбросы сточных вод, аварии), влияние которых в настоящее время установлено для устьевой зоны Северной Двины и кутовой части Двинского зал. [20]. Можно предположить, что антропогенная нагрузка по НУ в осенние месяцы могла бы быть в расчетах увеличена для некоторых акваторий Белого моря (особенно для Двин-

ского и Кандалакшского заливов), если учесть среди дополнительных источников загрязнения морской среды поступления НУ в поверхностные воды из атмосферы [21, 30]. Таким образом, получение экспериментальных оценок поступления НУ из разных источников в арктические моря, в частности в экосистему Белого моря, — актуальная проблема современных экологических исследований состояния и условий загрязнения морских экосистем. Такая информация необходима для инициирования специальных направленных модельных расчетов условий поступления и трансформации НУ в экосистемах арктических морей.

Важными показателями активности бактерий *B2* в морской среде служит потребление ими O_2 (ПК) и органических субстратов, в частности растворенного органического С (DOC) и НУ (или ΣС). Эти характеристики можно использовать для оценки скоростей самоочищения морских вод. Для арктического региона оценки самоочищения морских вод от НУ в литературе практически отсутствуют (имеются лишь экспериментальные весьма ограниченные данные, полученные на лабораторных моделях). Предполагается, что развитие указанных процессов в водах арктических морей происходит медленнее в сравнении с таковыми в морях умеренных и южных широт [34].

Обычно по значениям ПК и ΣС оценивается окислительная активность бактериального разложения органических веществ (ОВ), включая НУ. Оцененные по результатам моделирования внутригодовой динамики концентраций НУ и биомасс бактерий *B2* изменения в разные месяцы указанных показателей окислительной активности *B2* в акваториях заливов и открытой части Белого моря показаны на рис. 4 и 5 соответственно. Эти расчетные показатели объясняют, как активно происходит разложение органических субстратов бактериями *B2* и сколько при этом в разные месяцы расходуется растворенного в воде O_2 в акваториях Белого моря.

В водах заливов наибольший расход O_2 на окисление органических субстратов отмечается в весенние и осенние месяцы при повышенных концентрациях в воде НУ и биомасс бактерий *B2* (рис. 2а, 2б). В водах Кандалакшского зал. наибольший расход O_2 на окисление органических субстратов приходится только на сентябрь—октябрь (1.486–1.312 мг O_2 /(л мес.)), в Онежском зал. — на июль (1.408) и сентябрь—октябрь (2.043–1.765), в Двинском и Мезенском заливах — на июнь (0.846 и 0.857) и сентябрь—октябрь (1.922–1.125 и 1.905–1.218), в губе Чула — на июль—ок-

тябрь (2.702–3.508 мг O_2 /(л мес.)). В указанные месяцы в водах заливов бактериями *B2* потребляется и наибольшее количество органических субстратов (рис. 4). В каждой рассмотренной акватории скорости окисления ОВ были повышены в сентябре и для этого месяца составляли 0.523–1.241 мг С/(л мес.) (или 0.017–0.041 мг С/(л сут)). Расчеты показывают, что на окисление 1 мг ОВ бактерии *B2* в месяцы наибольшей их активности потребляют в водах заливов 2.795–2.849 мг O_2 .

В водах открытой части моря наибольший расход O_2 на окисление органических субстратов приходится преимущественно на летние месяцы. Так, в водах района Соловецких о-вов наибольший расход O_2 отмечается в июле—сентябре (1.159–1.519 мг O_2 /(л мес.)), в водах районов Бассейна, Горла и Воронки — в июле—августе (соответственно 1.225–0.993, 1.610–1.120 и 1.424–0.853 мг O_2 /(л мес.)) (рис. 5). В указанные месяцы в водах открытой части моря бактерии *B2* потребляют от 0.306 до 0.571 мг С/(л мес.) (или 9.864×10^{-3} – 1.841×10^{-2} мг С/(л сут)). На окисление 1 мг ОВ бактерии *B2* в месяцы их наибольшей активности летом в открытой части моря потребляют 2.797–2.822 мг O_2 (или практически такое же количество O_2 , как и в водах заливов).

Сравнение соотношений внутренних потоков O_2 и органических субстратов ΣС, потребляемых бактериями *B2* в водах заливов и открытой части моря в течение года (рис. 6), показывает, что на окисление 1 мг ОВ расходуется за год в этих водах соответственно 2.811–2.823 и 2.804–2.808 (в среднем для всех акваторий 2.811) мг O_2 . На полное окисление 1 мг НУ (до CO_2 и H_2O) требуется от 3 до 4 мг O_2 , а при переходе определенной доли С в микробную биомассу расходуется меньшее количество O_2 [26]. Отметим, что полученные в данном исследовании расчетные оценки расходования O_2 на окисление органических субстратов (в частности, НУ) близки к таковым, полученным для других морских экосистем [8, 9].

Отличительная особенность экосистем северных морей — способность сообщества микроорганизмов осуществлять трансформацию ЗВ, включая НУ, при низких температурах воды (T_w). Отмечается, что процессы естественного очищения от нефтяных ЗВ в арктических морях в большинстве случаев развиваются интенсивнее, чем процессы накопления НУ. В экосистемах северных морей из-за низкой энергии активации (3–6 ккал/М [23]) происходит интенсивное преобразование как автохтонного, так и аллохтонного ОВ, а НУ-окисляющая активность микрофлоры усиливает-

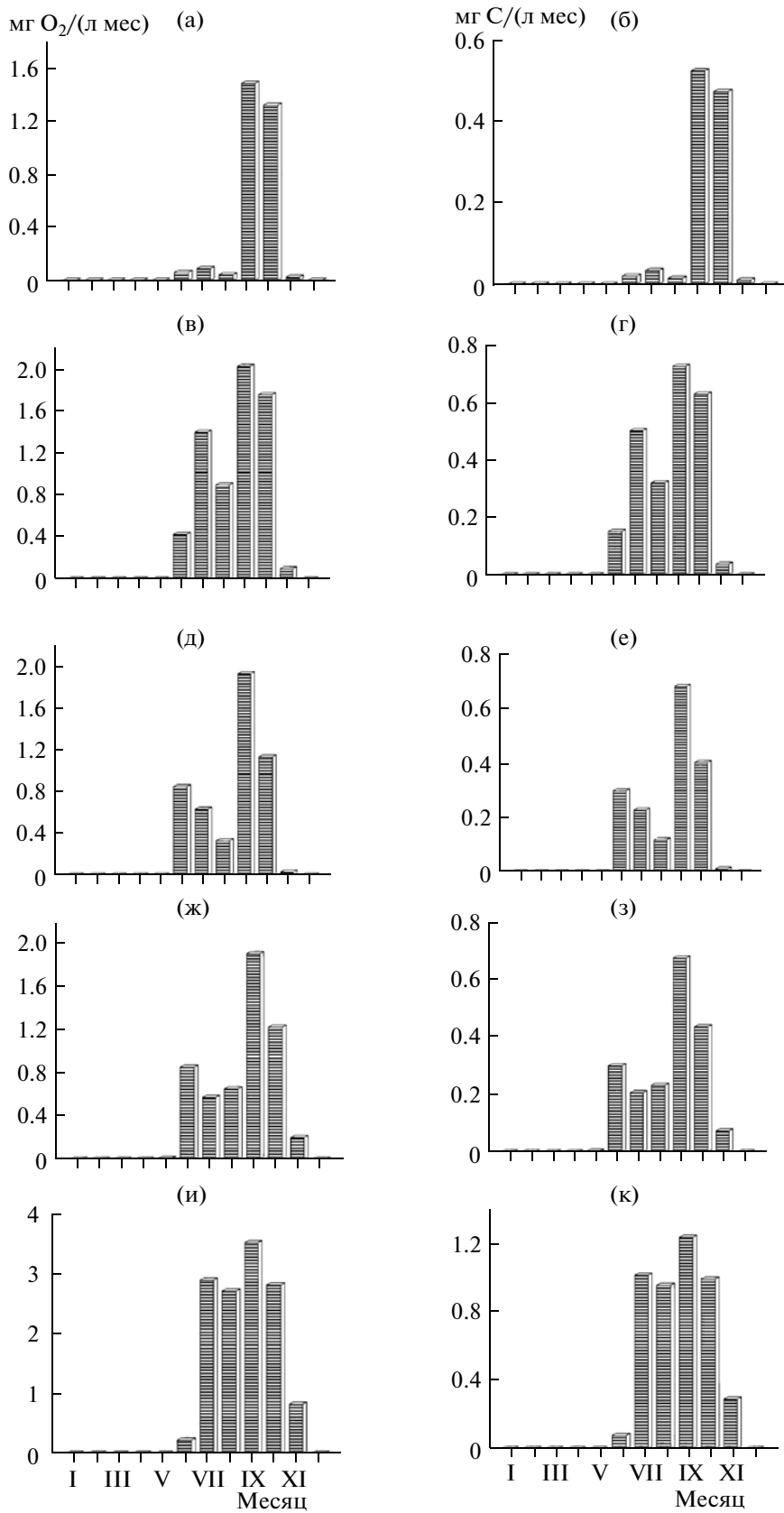


Рис. 4. Изменение в разные месяцы значений потребления O₂ (левые графики) и NH₄ (правые графики) бактериями B2 в заливах Белого моря Кандалакшском (а, б), Онежском (в, г), Двинском (д, е), Мезенском (ж, з), в губе Чупа (и, к).

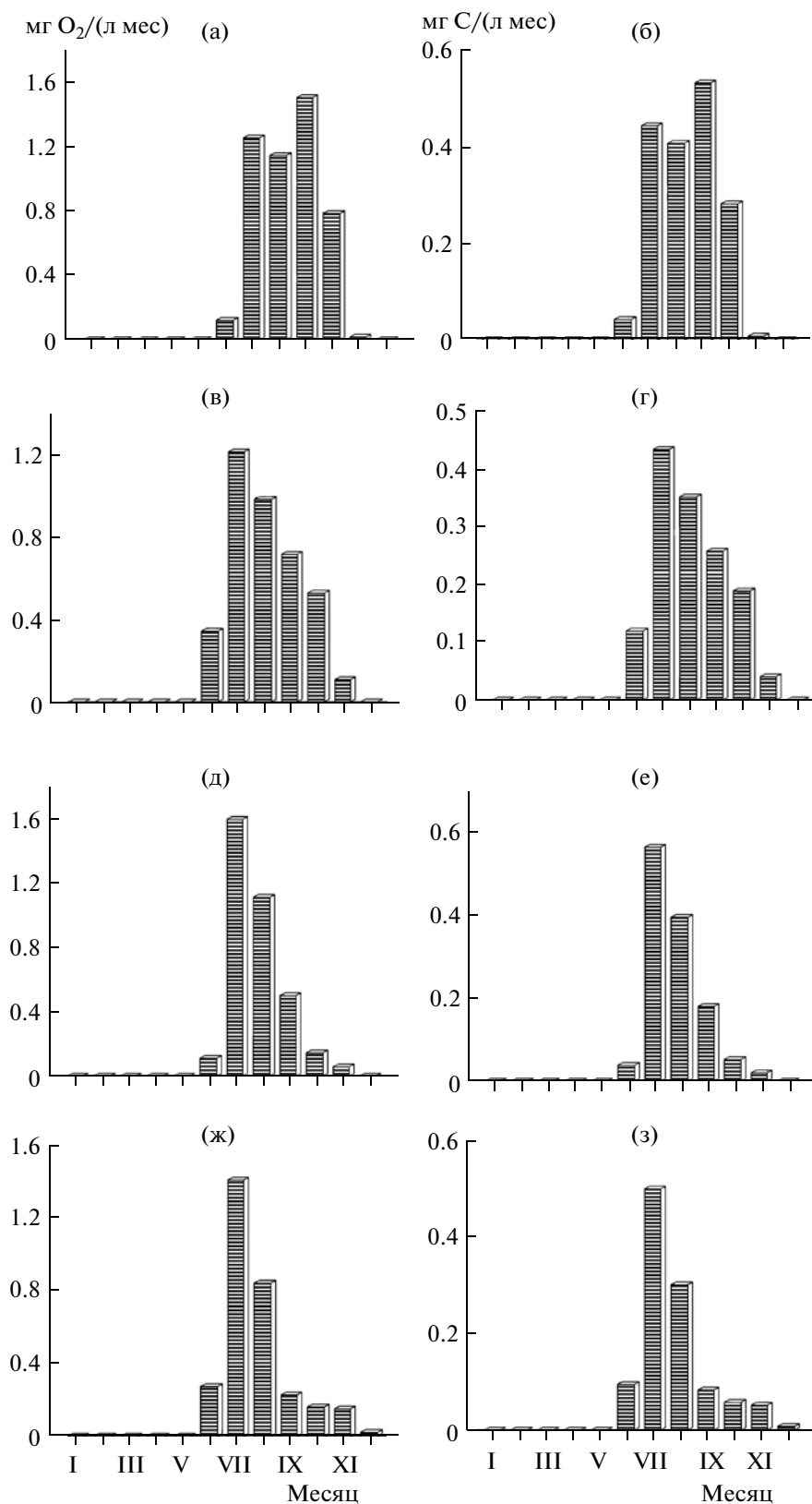


Рис. 5. Изменение в разные месяцы значений потребления O_2 (а, в, д, ж) и НУ (б, г, е, з) бактериями B2 в открытой части Белого моря: а, б – акватория Соловецких о-вов; в, г – Бассейн; д, е – Горло; ж, з – Воронка.

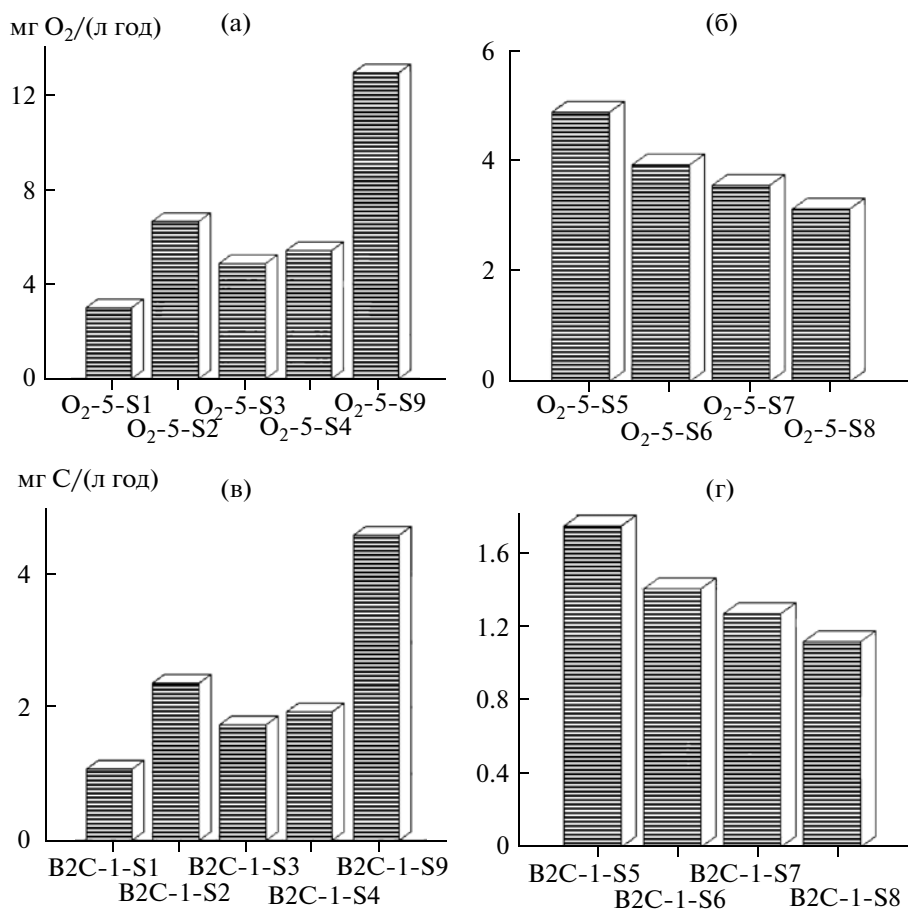


Рис. 6. Годовые значения потоков потребления бактериями *B2*: O₂ (поток 5: (а) – районы 1–4 и 9; (б) – районы 5–8), и НУ (поток 1: (в) – районы 1–4 и 9, (г) – районы 5–8).

ся во время разливов НУ даже при низких T_w [2, 17]. Репрезентативный показатель НУ-окисляющих бактерий (их потенциальная окислительная активность) оценивается либо с помощью экспериментальных работ [2], либо расчетным путем на основе применения математического моделирования [6].

Расчетные скорости потребления НУ бактериями *B2* в водах Кандалакшского зал., оцененные по результатам моделирования в данном исследовании, можно сравнить с экспериментальными оценками, полученными при изучении процессов бактериальной деструкции НУ в кутовой части этого залива в августе при варьировании T_w от 8.5 до 15.0°C [2]. При расчетах на модели использовано среднееголетнее значение T_w для августа в мелководной части Кандалакшского зал. – 13.7°C (с колебаниями от начала к концу месяца от 14.3 до 11.5°C) [10, 11]. Оцененные экспериментально для 10 станций в кутовой части залива скорости окисления углеводорода-субстрата (¹⁴С-октадекана) летом менялись в диапазоне 42.4–

89.5 нг/(л ч) (или 1.018–2.148 мкг/(л сут)). Наибольшие значения экспериментально оцененных скоростей окисления углеводородов (>80 нг/(л ч)) были отмечены в загрязненных водах – вблизи рыбоконсервного завода и нефтебазы [2]. Расчетное значение скорости потребления НУ бактериями *B2* в июле–августе (при близких по максимальным T_w условиям) менялось от 0.493 до 0.238 мкг НУ/(л сут). Эти модельные оценки можно считать отвечающими заданным условиям среды обитания. Следует учесть, что результаты моделирования характеризуют условия трансформации НУ в объеме всей водной массы рассмотренной акватории Кандалакшского зал., а экспериментальные наблюдения – условия в меньшем объеме вод – только в прибрежной кутовой его части, подверженной антропогенному воздействию. Весь объем вод Кандалакшского зал. менее загрязнен в сравнении с водами его прибрежных зон, в которых содержание НУ выше ПДК в 2–6 раз [5]. Это объясняет, почему расчетные значения скоростей окисления НУ несколько ниже в сравне-

нии со скоростями, полученными при экспериментальном изучении условий распада углеводорода-субстрата. С учетом сделанных пояснений отмеченные расхождения в оценках скоростей окисления НУ физически обоснованы и вполне допустимы при подобных сравнениях.

Для характеристики взаимосвязи между химическими и биологическим переменными состояниями морской среды были вычислены значения продукции бактерий B_2 (БП_{B2}). Для этого были использованы расчетные значения внутренних потоков органических субстанций, рассчитываемые при моделировании динамики концентраций С-содержащих субстратов и биомасс B_2 в каждой акватории Белого моря. Значения БП_{B2} вычислялись на единицу объема вод верхнего слоя в г С/м³ на каждой временной итерации. Затем путем их суммирования получали значения БП_{B2} для каждого месяца и в целом за год для исследуемых районов Белого моря. Далее значения на единицу объема вод для каждого месяца и за год пересчитывали с учетом толщины слоя и объема вод в нем в общую БП_{B2} для каждого месяца в тыс. т С/мес. и путем суммирования ежемесячных значений БП_{B2} получали их годовые значения в тыс. т С/год. Вычисленные значения БП_{B2} для районов 1–9 Белого моря приведены в табл. 4. Следует отметить, что значения БП_{B2} более чем на порядок ниже БП гетеротрофных бактерий, у которых в целом выше скорости потребления субстратов питания [10].

Сезонные изменения значений БП_{B2} в каждой акватории Белого моря соответствуют изменениям показателей активности биомасс B_2 . В мелководной части Кандалакшского зал. наибольшие значения БП_{B2} приходятся на сентябрь–октябрь, в Онежском зал. — на июль и сентябрь–октябрь, в Двинском и Мезенском заливах — на июнь и сентябрь–октябрь, в Бассейне — на июль–сентябрь, в Горле и Воронке — на июль–август, в губе Чупа — на июль–октябрь. Возрастание годовых значений БП_{B2} по акваториям моря происходит в следующей их последовательности: Кандалакшский зал.—Воронка—Горло—Бассейн—Двинский зал. Соловецкие о-ва—Мезенский зал.—Онежский зал.—губа Чупа (табл. 4).

Таким образом, оцененное распределение концентраций НУ, биомасс бактерий B_2 и показателей их окислительной активности в акваториях Белого моря, как и оцененное в предыдущих исследованиях [10–12] распределение БВ, обнаруживает специфические неоднородности, которые определяются составным эффектом перераспре-

деления химических и биологических компонентов водными массами, поступлением НУ из разных источников и их биотрансформацией в водной среде. Результаты выполненных с помощью CNPSI-модели расчетов показывают существенную роль живого вещества в биотрансформации БВ и НУ — специфических компонентов морской среды, попадающих в нее за счет естественных процессов и при выраженном антропогенном воздействии. Отдельные составляющие указанных процессов в количественном отношении изучены еще недостаточно, поэтому крайне необходимы регулярные натурные наблюдения и специальные экспериментальные исследования для получения количественной информации о поступлении, перераспределении, условиях биотрансформации и присутствии БВ и НУ в разных районах Белого моря.

РАСЧЕТНЫЙ БАЛАНС КОНЦЕНТРАЦИЙ НУ В ВОДАХ РАЗНЫХ РАЙОНОВ БЕЛОГО МОРЯ

По результатам проведенных на модели расчетов были оценены составляющие годовых балансов НУ в тыс. т НУ для 10-метрового поверхностного слоя и всего столба воды в районах 1–9 Белого моря. При этом были учтены поступления НУ в водную среду (с речным стоком, баренцевоморскими водами, из дополнительных источников, при переносе из соседних районов) и их потери (на биотрансформацию и вынос в соседние районы) (табл. 5). Пересчет в тыс. т НУ означает, что существенную роль в оцененных значениях составляющих баланса НУ имеет не только реальный поток НУ в рассматриваемых районах моря, но и объем водных масс этих районов. Анализ полученных расчетных значений проведем на основе оцененных потоков НУ для всего столба воды.

При сравнении отдельных районов моря выявляются существенные пространственные различия в учитываемых источниках нагрузки по НУ. Так, влияние речного стока как источника загрязнения морской среды заливов снижается в ряду: Двинский зал (11.629 тыс. т НУ)—район Соловецких о-вов (2.044)—Мезенский зал. (1.126)—Онежский зал. (0.691)—Кандалакшский зал. (0.423) и губа Чупа (0.093 тыс. т НУ). Оцененное влияние дополнительных источников нагрузки по НУ на отдельные районы моря снижается в следующей последовательности: Воронка (380.473 тыс. т НУ)—Двинский зал. (110.157)—Бассейн (100.702)—Горло (90.468)—район Соловецких о-вов (64.587)—Онежский зал. (34.466)—Кандалакшский зал. (17.427)—Мезенский зал. (14.898)—губа Чупа (0.288 тыс. т НУ). Снижение влияния нагрузки по НУ за счет их пе-

Таблица 4. Расчетные значения продукции бактерий *B2* (для верхнего 10-метрового слоя) в районах 1–9 Белого моря (числитель – г С/(м³ мес) и г С/(м³ год), знаменатель – тыс. т С/мес. и тыс. т С/год)

Район	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	За год
1	$\frac{9.90 \times 10^{-5}}{0.002}$	$\frac{6.30 \times 10^{-8}}{1.23 \times 10^{-6}}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{4.00 \times 10^{-9}}{7.80 \times 10^{-8}}$	$\frac{2.63 \times 10^{-5}}{5.13 \times 10^{-4}}$	$\frac{0.0360}{0.702}$	$\frac{0.0692}{1.350}$	$\frac{0.0272}{0.531}$	$\frac{0.9999}{19.505}$	$\frac{0.9813}{19.142}$	$\frac{0.0304}{0.593}$	$\frac{2.92 \times 10^{-5}}{5.70 \times 10^{-4}}$	$\frac{2.1442}{41.824}$
2	$\frac{9.93 \times 10^{-6}}{9.04 \times 10^{-4}}$	$\frac{1.70 \times 10^{-8}}{1.55 \times 10^{-6}}$	$\frac{1.00 \times 10^{-9}}{9.10 \times 10^{-8}}$	$\frac{1.80 \times 10^{-8}}{1.64 \times 10^{-6}}$	$\frac{3.05 \times 10^{-4}}{0.028}$	$\frac{0.2713}{24.688}$	$\frac{1.0108}{91.483}$	$\frac{0.6371}{57.976}$	$\frac{1.4300}{130.130}$	$\frac{1.2901}{117.399}$	$\frac{0.1023}{9.309}$	$\frac{2.64 \times 10^{-5}}{0.002}$	$\frac{4.7319}{431.516}$
3	$\frac{9.93 \times 10^{-6}}{9.12 \times 10^{-4}}$	$\frac{1.90 \times 10^{-8}}{1.75 \times 10^{-6}}$	$\frac{1.00 \times 10^{-9}}{9.18 \times 10^{-8}}$	$\frac{3.51 \times 10^{-7}}{3.22 \times 10^{-5}}$	$\frac{2.48 \times 10^{-3}}{0.228}$	$\frac{0.5576}{51.208}$	$\frac{0.4834}{44.394}$	$\frac{0.2274}{20.884}$	$\frac{1.3338}{122.492}$	$\frac{0.8382}{76.978}$	$\frac{0.0330}{3.031}$	$\frac{5.34 \times 10^{-5}}{0.005}$	$\frac{3.4761}{319.221}$
4	$\frac{9.93 \times 10^{-6}}{5.86 \times 10^{-4}}$	$\frac{1.80 \times 10^{-8}}{1.06 \times 10^{-6}}$	$\frac{1.00 \times 10^{-9}}{5.90 \times 10^{-8}}$	$\frac{8.43 \times 10^{-7}}{4.97 \times 10^{-5}}$	$\frac{4.00 \times 10^{-3}}{0.236}$	$\frac{0.5700}{33.630}$	$\frac{0.4409}{26.013}$	$\frac{0.4416}{26.054}$	$\frac{1.3456}{79.390}$	$\frac{0.8881}{52.398}$	$\frac{0.1676}{9.888}$	$\frac{6.16 \times 10^{-4}}{0.036}$	$\frac{3.8584}{227.646}$
5	$\frac{9.84 \times 10^{-6}}{8.02 \times 10^{-4}}$	$\frac{1.70 \times 10^{-8}}{1.39 \times 10^{-6}}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{2.00 \times 10^{-9}}{1.63 \times 10^{-7}}$	$\frac{2.73 \times 10^{-5}}{0.002}$	$\frac{0.0768}{6.262}$	$\frac{0.8866}{72.291}$	$\frac{0.8205}{66.901}$	$\frac{1.0825}{88.264}$	$\frac{0.5929}{48.343}$	$\frac{0.0248}{2.022}$	$\frac{2.29 \times 10^{-5}}{0.002}$	$\frac{3.4841}{284.088}$
6	$\frac{9.95 \times 10^{-6}}{0.002}$	$\frac{1.70 \times 10^{-8}}{3.55 \times 10^{-6}}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{1.19 \times 10^{-4}}{0.025}$	$\frac{0.2186}{46.655}$	$\frac{0.8736}{182.494}$	$\frac{0.7084}{147.984}$	$\frac{0.5304}{110.800}$	$\frac{0.3835}{80.113}$	$\frac{0.0934}{19.511}$	$\frac{1.88 \times 10^{-4}}{0.039}$	$\frac{2.8082}{586.633}$
7	$\frac{9.94 \times 10^{-6}}{5.87 \times 10^{-4}}$	$\frac{1.70 \times 10^{-8}}{1.51 \times 10^{-6}}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{9.62 \times 10^{-7}}{8.56 \times 10^{-5}}$	$\frac{0.0669}{5.954}$	$\frac{1.1182}{99.520}$	$\frac{0.8123}{72.295}$	$\frac{0.3782}{33.660}$	$\frac{0.1109}{9.870}$	$\frac{0.0455}{4.050}$	$\frac{7.37 \times 10^{-4}}{0.066}$	$\frac{2.5327}{225.416}$
8	$\frac{9.64 \times 10^{-6}}{0.003}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{1.01 \times 10^{-7}}{2.62 \times 10^{-5}}$	$\frac{1.33 \times 10^{-4}}{0.034}$	$\frac{0.1712}{44.341}$	$\frac{1.0010}{259.259}$	$\frac{0.6245}{161.746}$	$\frac{0.1752}{45.377}$	$\frac{0.1162}{30.096}$	$\frac{0.1071}{27.739}$	$\frac{0.0197}{5.102}$	$\frac{2.2150}{573.697}$
9	$\frac{9.89 \times 10^{-5}}{5.64 \times 10^{-5}}$	$\frac{6.80 \times 10^{-8}}{3.88 \times 10^{-8}}$	$\frac{6.00 \times 10^{-9}}{3.42 \times 10^{-9}}$	$\frac{4.00 \times 10^{-9}}{2.28 \times 10^{-9}}$	$\frac{4.88 \times 10^{-5}}{2.78 \times 10^{-5}}$	$\frac{0.1355}{0.077}$	$\frac{2.0026}{1.141}$	$\frac{1.9104}{1.089}$	$\frac{2.4763}{1.412}$	$\frac{2.0175}{1.150}$	$\frac{0.6295}{0.359}$	$\frac{0.0107}{0.006}$	$\frac{9.1827}{5.235}$

Таблица 5. Расчетный баланс НУ, тыс. т НУ/год, для отдельных районов Белого моря (моделирование, верхний слой; перед косой чертой – для 10-метрового слоя, после черты – для всего столба воды; в скобках – доля, %, в сумме (Σ) потоков для всего столба воды)

Составляющие баланса	Кандалакшский зал. $h = 36.5$ м, $V = 71.2$ км ³	Онежский зал. $h = 15.0$ м, $V = 136.5$ км ³	Двинский зал. $h = 49.0$ м, $V = 450$ км ³	Мезенский зал. $h = 10.0$ м, $V = 59.0$ км ³	Губа Чупа $h = 20.0$ м, $V = 1.14$ км ³
Приход					
с речным стоком	0.116/0.423 (2.4)	0.461/0.691 (1.9)	2.386/11.689 (9.5)	1.126 (6.8)	0.047/0.093 (24.3)
дополнительные источники	4.774/17.427 (97.6)	22.978/34.466 (96.3)	22.481/110.157 (89.2)	14.898 (89.1)	0.144/0.288 (75.2)
перенос из соседних районов	–	0.416/0.624 (1.8)	0.330/1.617 (1.3)	0.690 (4.1)	0.002/0.002 (0.5)
Σ потоков	4.890/17.850 (100.0)	23.855/35.781 (100.0)	25.197/123.463 (100.0)	16.714 (100.0)	0.193/0.383 (100.0)
Потери					
потребление бактериями B_2	4.461/16.283 (89.8)	23.787/35.681 (99.4)	25.353/124.231 (97.6)	16.817 (96.5)	0.191/0.381 (96.7)
вынос в соседние районы	0.507/1.849 (10.2)	0.156/0.233 (0.6)	0.623/3.054 (2.4)	0.606 (3.5)	0.007/0.013 (3.3)
Σ потоков	4.968/18.132 (100.0)	23.943/35.914 (100.0)	25.976/127.285 (100.0)	17.423 (100.0)	0.198/0.394 (100.0)
баланс [невязка, %]	–0.078/–0.282 [1.6]	–0.088/–0.133 [0.4]	–0.779/–3.822 [3.0]	–0.709 [4.1]	0.005/–0.011 [2.8]
модуль нагрузки, тыс. т НУ/ V , км ³	0.251	0.262	0.274	0.283	0.336
Открытые акватории и все море	Соловецкие о-ва $h = 31.36$ м, $V = 255.79$ км ³	Бассейн $h = 138.0$ м, $V = 398.82$ км ³	Горло $h = 38.0$ м, $V = 338.2$ км ³	Воронка $h = 52.0$ м, $V = 1346.8$ км ³	Все море
Приход					
с речным стоком	0.652/2.044 (3.0)	–	–	–	4.788/16.066 (1.7)
с водами Баренцева моря	–	–	–	17.042/88.620 (18.8)	17.042/88.620 (9.7)
дополнительные источники	20.588/64.587 (96.3)	52.747/100.702 (91.7)	23.807/90.468 (95.1)	73.168/380.473 (80.9)	235.585/813.466 (88.6)
перенос из соседних районов	0.148/0.463 (0.7)	4.768/9.104 (8.3)	1.234/4.691 (4.9)	0.255/1.327 (0.3)	–
Σ потоков	21.388/67.094 (100.0)	57.515/109.806 (100.0)	25.041/95.159 (100.0)	90.465/470.420 (100.0)	257.415/918.152 (100.0)
Потери					
потребление бактериями B_2	21.075/66.113 (98.0)	56.233/107.358 (98.1)	23.846/90.615 (95.6)	87.177/453.320 (95.8)	258.940/910.799 (98.4)
вынос в соседние районы	0.433/1.360 (2.0)	1.093/2.086 (1.9)	1.100/4.179 (4.4)	0.988/5.139 (1.1)	–
вынос из Белого в Баренцево море	–	–	–	2.826/14.697 (3.1)	2.826/14.697 (1.6)
Σ потоков	21.508/67.473 (100.0)	57.326/109.444 (100.0)	24.946/94.794 (100.0)	90.991/473.156 (100.0)	261.766/925.496 (100)
баланс [невязка, %]	–0.120 / –0.378 [0.6]	0.189/0.362 [0.3]	0.095/0.365 [0.4]	–0.526/–2.736 [0.6]	–4.351/–2.656 [–1.2]
модуль нагрузки, тыс. т НУ/ V , км ³	0.262	0.275	0.281	0.349	0.306

реноса водными массами из соседних районов демонстрирует следующая последовательность районов: Бассейн (9.104 тыс. т НУ)—Горло (4.691)—Двинский зал. (1.617)—Воронка (1.327)—Мезенский зал. (0.690)—Онежский зал. (0.624)—район Соловецких о-вов (0.463)—губа Чупа (0.002 тыс. т НУ).

В целом районы моря по снижению поступления НУ из разных источников можно расположить в следующий ряд: Воронка (470.420 тыс. т НУ)—Двинский зал. (123.463)—Бассейн (109.806)—Горло (95.159)—район Соловецких о-вов (67.094)—Онежский зал. (35.781)—Кандалакшский зал. (17.850)—Мезенский зал. (16.714)—губа Чупа (0.383 тыс. т НУ), в котором положение отдельных районов зависит от оцененного выше образования/поступления НУ из дополнительных источников. Если принять за 100% общее поступление НУ в морскую среду в отдельных районах Белого моря, то получим для источников нагрузки по НУ (речного стока, дополнительных источников, переноса водными массами из соседних районов и из Баренцева моря) следующие пределы их влияний — 1.9—24.3, 75.2—97.6, 0.3—8.3 и 18.8% соответственно (табл. 5).

Потери НУ в основном зависят от их разложения/потребления бактериями B_2 в водной среде. Значимость этого процесса для районов Белого моря снижается в следующей их последовательности: Воронка (453.320 тыс. т НУ)—Двинский зал. (124.231)—Бассейн (107.358)—Горло (90.615)—район Соловецких о-вов (66.113)—Онежский зал. (35.681)—Мезенский зал. (16.817)—Кандалакшский зал. (16.283)—губа Чупа (0.381 тыс. т НУ). Также некоторая доля потерь НП определяется выносом водными массами через границы в соседние районы. Роль этого процесса по районам моря снижается в следующей их последовательности: Воронка (5.139 тыс. т НУ) — Горло (4.179)—Двинский зал. (3.054)—Бассейн (2.086)—Кандалакшский зал. (1.849)—район Соловецких о-вов (1.360)—Мезенский зал. (0.606)—Онежский зал. (0.233)—губа Чупа (0.013 тыс. т НУ). Общие потери НУ снижаются по районам моря в следующем ряду: Воронка (473.156 тыс. т НУ)—Двинский зал. (127.285)—Бассейн (109.444)—Горло (94.794)—район Соловецких о-вов (67.473)—Онежский зал. (35.914)—Кандалакшский зал. (18.132)—Мезенский зал. (17.423)—губа Чупа (0.394 тыс. т НУ). Доля потерь НУ, определяемая процессами биотрансформации, меняется по районам моря в пределах 89.8—99.4%, а выноса НУ в соседние районы — 0.6—10.2%, на вынос водными массами из Белого моря в Баренцево приходится 3.1% всех потерь для района Воронка (табл. 5).

Несмотря на разную выраженность процессов поступления и потерь НУ по районам Белого моря, годовой баланс положительных и отрицательных потоков НУ в разных районах меняется в сравнительно небольшом диапазоне — от -3.822 до 0.365 тыс. т НУ при его невязке (отношение по модулю баланса НУ к суммарному их поступлению), колеблющейся от 0.3 до 4.1%. Увеличение невязки баланса по районам моря характеризует следующий ряд: Бассейн (0.3%)—Горло и Онежский зал. (по 0.4)—район Соловецких о-вов и Воронка (по 0.6)—Кандалакшский зал. (1.6)—губа Чупа (2.8)—Двинский зал. (3.0)—Мезенский зал. (4.1%). Это характеризует в целом достаточно высокую сбалансированность процессов поступления и трансформации НУ (или положительных и отрицательных потоков НУ) по районам моря (табл. 5).

Оцененный для отдельных акваторий модуль нагрузки по НУ (отношение общего поступления НУ к объему вод рассматриваемого района) выявил сравнительно небольшие отличия в значениях этого показателя — от 0.251 до 0.349 тыс. т НУ/км³. По возрастанию значения модуля нагрузки районы Белого моря располагаются в следующей последовательности: Кандалакшский зал. (0.251 тыс. т НУ/км³)—Онежский зал. и район Соловецких о-вов (по 0.262)—Двинский зал. и Бассейн (0.274—0.275)—Горло и Мезенский зал. (0.281—0.283)—губа Чупа (0.336)—Воронка (0.349 тыс. т НУ/км³) (табл. 5). Отметим, что есть логическое соответствие близких значений модуля нагрузки по НУ для ряда взаимосвязанных (соседних) районов моря (в частности, Онежского зал. и района Соловецких о-вов; Двинского зал. и Бассейна; Горла и Мезенского зал.).

На основании оцененных потоков НУ для отдельных районов был составлен итоговый годовой баланс НУ в целом для Белого моря. При его составлении из рассмотрения исключались те потоки НУ, которые характеризуют процессы переноса/выноса НУ водными массами между соседними районами моря и находятся в пределах акватории моря. В результате получаем, что за год в Белое море поступает 928.152 тыс. т НУ (87.6% за счет дополнительных источников, 9.6% с баренцевоморскими водами и 2.8% с речным стоком), а годовые потери НУ составляют 925.496 тыс. т НУ (на 98.4% они связаны с процессами потребления НУ бактериями B_2 и на 1.6% — с выносом их водными массами из Белого моря в Баренцево). С учетом этих потоков НУ получена невязка $\sim 1.2\%$ между приходной и расходной составляющими баланса НУ для всего моря, которая свидетель-

ствует о хорошей сбалансированности потоков НУ в экосистеме Белого моря. Оцененное значение модуля нагрузки по НУ на экосистему Белого моря в целом для водоема составляет значение 0.306 тыс. т НУ/км³ (табл. 5).

ВЫВОДЫ

Имеющиеся разрозненные наблюдения за изменением концентраций НУ в воде отдельных районов Белого моря нельзя использовать для характеристики их сезонной динамики и особенностей трансформации в морской среде.

Водообмен на границах река—море обеспечивает меньшее поступление НУ в заливы Белого моря в сравнении с районом Воронка. В этот район из Баренцева моря поступает за год 88.699 тыс. т НУ, что в 5.5 раз выше их поступления в Белое море с основными притоками. Ранее роль Баренцева моря в нагрузке на воды Белого моря по НУ практически никак не оценивалась.

Со стоком рек Северная Двина, Онега, Мезень, Нива, Кемь и Кереть в отдельные районы Белого моря поступает соответственно 11.766, 0.691, 1.127, 0.424, 2.048, 0.094 тыс. т НУ/год. Эти значения близки имеющимся в литературе данным.

Оцененные поступления НУ со сточными водами в воды Двинского, Кандалакшского и Онежского заливов в среднем составляют 14.957, 0.584 и 0.237 т НУ, а в пересчете на объемы их вод — 4.557×10^{-8} , 9.646×10^{-9} и 1.85×10^{-7} мг НУ/(л сут) соответственно.

Учет нагрузки по НУ на отдельные заливы Белого моря (речной сток, сбрасываемые в заливы сточные воды, вынос НУ в Белое море из Баренцева моря) и перераспределение НУ между районами моря течениями недостаточны для воспроизведения характерных сезонных изменений концентраций НУ в море: в период лето—осень расчетные концентрации НУ намного ниже наблюдаемых.

Существенными потенциальными источниками дополнительного поступления НУ в морскую среду летом—осенью служат их природное (биогенное) образование микроорганизмами и антропогенная нагрузка за счет активизации судоходства. Влияние этих источников загрязнения было принято идентичным для районов Белого моря и оценено суммарно в серии расчетов на модели. На единицу объема вод суммарные значения скоростей поступления НУ для мая, июня—июля, августа—октября и ноября составили 7.00×10^{-4} , 1.25×10^{-3} , 1.50×10^{-3} и 5.00×10^{-4} мг НУ/(л сут)

соответственно. Для января—апреля и декабря эти скорости принимались пренебрежимо малыми и в расчетах не учитывались.

В январе—апреле динамика концентраций НУ в водах моря не связана с активностью бактерий *B2* (она низкая). В воде заливов Кандалакшский, Онежский, Двинский и Мезенский содержание НУ в этот период постепенно увеличивается при общей сбалансированности процессов поступления НУ из внешних источников и их последующего переноса в открытые районы моря. В этот период в открытых районах Белого моря содержание НУ зависит преимущественно от водообмена с соседними заливами и с Баренцевым морем; в водах Бассейна, Горла и Воронки скорости роста концентраций НУ выше при более интенсивном водообмене, а в районе Соловецких о-вов они ниже в сравнении с условиями в заливах Белого моря.

В мае за счет влияния дополнительных источников в водах Кандалакшского, Онежского, Двинского, Мезенского заливов и губы Чупа формируются соответствующие промежуточные максимумы концентраций НУ (0.0701, 0.0593, 0.0617, 0.0599 и 0.0964 мг НУ/л). Весенняя активизация развития биомасс *B2* снижает содержание НУ в водах Онежского, Двинского, Мезенского заливов и губы Чупа соответственно до 0.0066, 0.0094, 0.0099 и 0.0052 мг/л. Максимальные значения удельных скоростей роста биомассы бактерий *B2* ($\tau_{B2} = 0.252 \text{ сут}^{-1}$) в заливах Белого моря в этот период свидетельствуют об их высокой окислительной активности. В водах Кандалакшского зал. условия развития бактерий *B2* в мае менее благоприятны, и здесь содержание НУ увеличивается до начала сентября (до 0.1099 мг НУ/л). В июле—августе содержание НУ в водах Онежского, Двинского, Мезенского заливов и губы Чупа увеличивается, и во второй половине августа в этих районах формируются летние максимумы (0.0158, 0.0371, 0.0297 и 0.0083 мг НУ/л), что вызывает повторную активизацию развития биомасс бактерий *B2* и образование в сентябре в водах заливов второго их максимума. Воды Кандалакшского зал. отличает средняя окислительная активность бактерий *B2* (при наибольшем значении $\tau_{B2} = 0.152 \text{ сут}^{-1}$), а Онежского, Двинского и Мезенского заливов — низкая (при наибольших значениях τ_{B2} 0.042, 0.097 и 0.084 сут^{-1}).

В сентябре с увеличением биомассы бактерий *B2* в водах Кандалакшского, Онежского, Двинского, Мезенского заливов и губы Чупа концентрации НУ снижаются, а к концу года — увеличиваются. Активность бактерий *B2* снижается при

сохранении с октября до конца года отрицательных значений удельных скоростей их роста.

В мае концентрации НУ в водах районов Соловецких о-вов, Бассейна, Горла и Воронки возрастают, но с меньшими скоростями в сравнении с заливами. В июне концентрации НУ достигают в этих районах промежуточных максимумов (соответственно 0.0646, 0.0562, 0.0647 и 0.0645 мг/л) практически в те же сроки, что и в заливах. Окислительная активность бактерий B_2 в мае–июне в водах Бассейна низкая (τ_{B_2} 0.065 сут⁻¹), а в водах Соловецких о-вов, Горла и Воронки – высокая (при наибольших значениях τ_{B_2} 0.250–0.252 сут⁻¹). В июне–июле с увеличением биомасс бактерий B_2 концентрации НУ в водах районов Соловецких о-вов, Бассейна, Горла и Воронки снижаются до минимальных значений (0.0070, 0.0046, 0.0028 и 0.0032 мг НУ/л). В августе следует небольшое возрастание концентраций НУ в водах районов Соловецких о-вов и Бассейна, что вызывает увеличение биомасс бактерий B_2 при низкой их окислительной активности (τ_{B_2} составляет 0.025 и 0.012 сут⁻¹). До начала ноября концентрации НУ в водах открытой части Белого моря снижаются (до 0.001–0.003 мг НУ/л), а к концу года – возрастают. В водах районов Соловецких о-вов, Бассейна и Горла биомасса бактерий B_2 и их окислительная активность до конца года в целом снижаются. Лишь в водах района Воронка в октябре–ноябре биомасса бактерий B_2 неизменна и характеризуется положительными значениями τ_{B_2} (с максимумом 0.002 сут⁻¹).

Сопоставление расчетных и наблюдаемых концентраций НУ показало, что в водах Двинского зал. оцененные по наблюдениям за 2002–2007 гг. средние и максимальные концентрации НУ составили 0.01–0.06 и 0.04–0.19, а для Кандалакшского зал. – 0.01–0.04 и 0.03–0.11 мг НУ/л соответственно. По расчетам эти концентрации НУ для вод Двинского зал. оценены равными 0.020 и 0.062, а Кандалакшского зал. – 0.036 и 0.110 мг НУ/л соответственно.

Сравнение для вод Двинского зал. расчетных концентраций НУ с имеющимися наблюдениями показало, что для мая, июня, июля и августа сравниваемые показатели достаточно близки, а для сентября–ноября среднемесячные наблюдаемые концентрации НУ в 4–16 раз выше расчетных. Это служит косвенным доказательством использования в расчетах для этого района заниженной нагрузки по НУ для осенних месяцев, по другим районам подобное сравнение из-за отсутствия сезонных наблюдений за динамикой концентраций НУ провести нельзя.

По значениям потребляемых микроорганизмами кислорода и субстратов оценивается их окислительная активность. В водах заливов наибольшее ПК и потребление органических субстратов бактериями B_2 происходит дважды в году – весной и осенью, а в открытой части моря – преимущественно летом. В период наибольшей активности бактерии B_2 на окисление 1 мг ОВ потребляют в разных районах практически одинаковое количество O_2 : в водах заливов – 2.795–2.849 и в открытых районах моря – 2.797–2.822 мг O_2 (среднее для всех районов – 2.811 мг O_2).

Для разных районов Белого моря получено соответствие сезонных изменений значений БП $_{B_2}$ и показателей их окислительной активности. На единицу объема вод годовые значения БП $_{B_2}$, г С/(м³ год), возрастают в следующей последовательности районов моря: Кандалакшский зал. (2.1442)–Воронка (2.2150)–Горло (2.5327)–Бассейн (2.8082)–Двинский зал. и Соловецкие о-ва (3.4761–3.4841)–Мезенский зал. (3.8584)–Онежский зал. (4.7319)–губа Чупа (9.1827). Так как объемы вод районов существенно различаются, то последовательность районов меняется при пересчете значений БП $_{B_2}$ на всю массу вод и выражении ее в тыс. т С/(м³ год): губа Чупа (5.235)–Кандалакшский зал. (41.824)–Горло (225.412)–Мезенский зал. (227.646)–Соловецкие о-ва (284.088)–Двинский зал. (319.221)–Онежский зал. (431.516)–Воронка (573.697)–Бассейн (586.633).

Составленные годовые балансы НУ для отдельных районов и в целом для Белого моря учитывают в приходной части привнос НУ с речным стоком, баренцевоморскими водами, из дополнительных источников и при переносе водными массами из соседних районов, а в расходной части – потери НУ при биотрансформации и выносе водными массами в соседние районы и из Белого моря в Баренцево. По снижению поступления НУ из разных источников, тыс. т НУ/год, районы моря располагаются в следующем порядке: Воронка (470.420)–Двинский зал. (123.463)–Бассейн (109.806)–Горло (95.159)–район Соловецких о-вов (67.094)–Онежский зал. (35.781)–Кандалакшский зал. (17.850)–Мезенский зал. (16.714)–губа Чупа (0.383). Значимость общих потерь НУ, тыс. т НУ/год, снижается по районам моря в следующей их последовательности: Воронка (453.320)–Двинский зал. (124.231)–Бассейн (107.358)–Горло (90.615)–район Соловецких о-вов (66.113)–Онежский зал. (35.681)–Мезенский зал. (16.817)–Кандалакшский зал. (16.283)–губа Чупа (0.381).

Значения модуля нагрузки по НУ для районов моря – от 0.251 до 0.349, а в целом для моря – 0.306 тыс. т НУ/км³. За год в Белое море поступает 928.152 тыс. т НУ (87.6% из дополнительных источников, 9.6% с баренцевоморскими водами и 2.8% с речным стоком), годовые потери НУ составляют 925.496 тыс. т НУ (98.4% потребляется бактериями *B2* и 1.6% выносятся водными массами из Белого моря в Баренцево). Невязка баланса между его приходной и расходной составляющими для моря в целом составляет ~1.2% (для отдельных районов она меняется в диапазоне 0.3–4.1%), что отражает сбалансированность потоков НУ в экосистеме моря и в его отдельных районах.

ПРИЛОЖЕНИЕ

(краткая характеристика CNPSi-модели)

Математическая CNPSi-модель описывает взаимосвязанные биогидрохимические циклы N, P и Si, а также (DOC) и режим O₂ в одно- или двухслойной водной экосистеме [6]. Эта модель может использоваться для изучения условий функционирования пресноводных и морских экосистем и для комплекса прикладных водно-экологических задач, так как учитывает взаимодействие природных и антропогенных факторов и отражает их влияние на морскую среду. Поэтому модель способна воспроизвести имеющиеся различия в распределении и концентрациях химических и биологических характеристик в разных акваториях изучаемого водного объекта.

CNPSi-модель рассчитывает динамику концентраций DOC, O₂, N-, P- и Si-содержащих органических и минеральных веществ при их биотрансформации в водной среде сообществом водных микроорганизмов (бактерии-, фито-, зоопланктон, макрофиты) и при развитии процессов обмена веществ на границах вода–дно, вода–воздух, водоем–приток, а также при переносе веществ водными массами через границы выделенных внутри изучаемого водоема акваторий.

Развитие биотрансформации вещества в водной среде формализовано в модели на основе имеющихся представлений о сохранении массы вещества и процессах его круговорота в водных экосистемах: утилизации микроорганизмами субстратов разной природы, образовании живой биомассы, выделении продуктов обмена веществ и формировании детрита. В принципе модель воспроизводит переходные процессы формирования биомассы и изменения концентраций ОВ и БВ и фактически отражает реакцию экосистемы на внешние воздействия. Граничные условия и информация об изменении в течение года (в виде

среднегодовых значений для каждого месяца) факторов состояния водной среды (водный режим, температура, освещенность и прозрачность водной среды, биогенная нагрузка), которые регулируют скорости трансформации веществ, задаются во входных данных. Для каждого выделенного участка задаются морфометрические параметры, при реализации модель оценивает на этих участках мгновенные переходные состояния в скоростях изменения и значениях концентраций веществ в зависимости от внешних воздействий, определяемых значениями факторов среды обитания.

Структура уравнений CNPSi-модели

1. Общий вид уравнения модели для описания изменения концентраций веществ C_{ijk} :

$$dC_{ijk}/dt = R_{ijk} + LOAD_{ijk} + TR_{ijk}, \quad (1)$$

где i – счетчик числа выделенных акваторий (максимально возможное число акваторий равно 10); j – счетчик модели для рассмотрения выделенных слоев ($j = 2$); k – счетчик для рассматриваемых компонентов модели ($k = 31$); R_{ijk} , $LOAD_{ijk}$, TR_{ijk} – скорости изменения концентраций веществ C_{ijk} : соответственно за счет биотрансформации компонентов, поступления веществ из внешних источников и пространственного (горизонтального и вертикального) переноса, мг Элемента/(л сут).

2. Структура уравнений для описания процессов биотрансформации веществ, R_{ijk} :

а) динамика биомасс B_k :

$$dB_k/dt = (UP - L - S) B_k - GZO, \quad (2)$$

$$UP = K(T, LGT)/(1 + B_C/PoolC + B_N/PoolN + B_P/PoolP + B_{Si}/PoolSi), \quad (3)$$

$$PoolC = d_k C_k, \quad PoolN = d_k N_k, \quad PoolP = d_k P_k,$$

$$PoolSi = d_k Si_k,$$

$$L = rUP, \quad r = aUP/(1 + bUP) + (1 - a/b),$$

$$S = q + mr + gB/UP;$$

б) механизм регуляции активности микроорганизмов:

соотношение биомасса/субстрат

$$(B_C/PoolC, B_N/PoolN, B_P/PoolP, B_{Si}/PoolSi),$$

$$r = f(UP), \quad S = f(r, UP), \quad L = f(UP), \quad S = f(UP);$$

в) динамика химических веществ C_{ijk} , детрита D и НУ:

$$\text{органических фракций: } dC_{ijk}/dt = L_o B_k - UP_o B_k + K_k D, \quad (4)$$

минеральных фракций: $dC_{ijk}/dt = L_m B_k - UP_m B_k$, (5)

детрита D : $dC_{ijk}/dt = S_k B_k - K_k D - UP_d B_k - K_{sed} D$, (6)

НУ: $dNU/dt = CZ_i - UP_{B2} B_2$, (7)

где UP , L , S , G – для микроорганизмов удельные скорости суммарного потребления веществ, суммарного выделения продуктов обмена, отмирания биомасс и ее выедания зоопланктоном соответственно, сут⁻¹; $UP = UP_o + UP_m + UP_d$ (UP_o , UP_m и UP_d – соответственно потребление микроорганизмами органических, минеральных фракций и детрита, сут⁻¹); $L = L_o + L_m$ (L_o , L_m – соответственно выделение микроорганизмами органических и минеральных веществ, сут⁻¹); $PoolC$, $PoolN$, $PoolP$, $PoolSi$ – соответственно запасы соединений C , N , P и Si для микроорганизмов; K , d_k , a , b , q , m , g – константы.

3. Уравнения для расчета скоростей поступления веществ $LOAD_{ijk}$:

$$LOAD_{ijk} = fl_{ijk} (Q_{pr} C_r / V_i) + CZ_{ijk} + W_{ijk}, \quad (8)$$

$$W_{ijO_2} = -KO_{14} (O_2 - O_{2n}), \quad (9)$$

$$O_{2n} = 14.61996 - 0.4042T_w + 0.00842T_w^2 - 0.00009T_w^3, \quad (10)$$

$$W_{ijN_2} = -KO_{33} (N_2 - N_{2atm}), \quad (11)$$

$$N_{2atm} = 22.33 \exp(-0.0207T_w). \quad (12)$$

Первый, второй и третий члены в правой части уравнения (8) показывают скорости поступления веществ в изучаемую акваторию соответственно с атмосферной влагой, из рассредоточенных источников и за счет обмена с атмосферой (для растворенных газов), мг Элемента/(л сут); V_i – объемы вод в изучаемой акватории водоема, км³; O_{2n} и N_{2atm} – концентрации растворенных в воде O_2 и N_2 при насыщении; T_w – температура водной среды; °C; KO_{14} , KO_{33} – константы скоростей реакции водной среды (соответственно для O_2 и N_2) за счет обмена с атмосферой.

4. Уравнения для транспортного члена TR_{ijk} :

$$TR_{ijk} = fl_k [TRIN_{ijk} + TRUP_{ijk} + TRSEC_{ijk} + TROUT_{ijk}], \quad (13)$$

$$TRIN_k = QWIN_{ij} CIN_{ki} / V_{ij}, \quad (14)$$

$$TRUP_k = abs(QWUP_i) (CM_{ki3-j} - Y_k) / V_{ij}, \quad (15)$$

$$TRSEC_{ki} = [(QW_{ij} CM_{kj}) - (QW_{ij} Y_k)] / V_{ij}, \quad (16)$$

$$TROUT_k = -(QWOUT_{ij} Y_k) / V_{ij}, \quad (17)$$

где $TRIN_{ijk}$, $TRUP_{ijk}$, $TRSEC_{ijk}$ – соответственно скорости поступления веществ в рассматриваемые акватории извне с водами притоков, за счет вертикального обмена с нижележащим слоем и переноса из соседних районов в пределах мор-

ской экосистемы; $TROUT_{ijk}$ – потери веществ при выносе водным потоком через внешние границы водной системы, мг Элемента/(л сут); $QWIN_{ij}$ – расходы воды внешних притоков в соответствующих акваториях моря, км³/мес; $QWUP_i$ – составляющая вертикального переноса веществ, км³/мес; $QWOUT_{ij}$ – расходы воды на внешних границах моря для расчетов выноса веществ из экосистемы моря, км³/мес; QW_{ij} – расходы воды через границы выделенных акваторий моря, км³/мес; Y_k – мгновенные концентрации веществ в соответствующих акваториях моря в рассматриваемом слое воды, мг Элемента/л; CM_{ki3-j} – мгновенные концентрации веществ в соответствующих акваториях моря в нижнем (или верхнем) слое столба воды, мг Элемента/л (требуется для расчета количества вещества, участвующего в переносе по вертикали); CIN_{ki} – концентрации рассматриваемых компонентов в водах притоков, мг Элемента/л; V_{ij} – объем вод рассматриваемых акваторий и слоев, км³; fl_k – управляющие параметры адвективного переноса веществ (безразмерные).

Таким образом, CNPSi-модель рассчитывает для разных акваторий изучаемой экосистемы водоема: внутригодовую динамику концентраций химических и биологических показателей состояния водной среды; мгновенные скорости процессов, ответственных за изменение концентраций веществ; внутренние и внешние потоки веществ; времена оборота всех рассматриваемых в модели химических и биологических компонентов; удельные скорости продукции гидробионтов; значения продуктивности рассматриваемого в модели сообщества водных микроорганизмов, осуществляющих биотрансформацию ОБ и БВ.

Результаты моделирования позволяют выявить особенности внутригодовой динамики биомасс и концентраций химических веществ в зависимости от комплекса океанологических условий и в итоге охарактеризовать особенности развития процессов биотрансформации БВ и ОБ в изучаемых акваториях экосистемы по достаточно полному набору расчетных характеристик (скорости отдельных процессов, внутренние и внешние потоки веществ, их баланс, биогенная нагрузка).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бамбуляк А., Францен Б. Транспортировка нефти из российской части Баренцева региона. По состоянию на январь 2005 г. Свандховт: Экологический Центр, 2005. 91 с. www.svandhovd.no
2. Ильинский В. В., Семенов М. Н. Распространение и активность углеводородокисляющих бактерий в центральном полярном бассейне, Карском и Белом морях // Опыт системных океанологических

- исследований в Арктике. М.: Науч. мир, 2001. С. 364–373.
3. *Коршенико А.Н., Матвейчук И.Г., Плотникова Т.И. и др.* Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Обнинск: ФОП, 2009. 199 с.
 4. *Лебедев А.А., Мискевич И.В.* Сезонная изменчивость содержания нефтяных углеводородов в водах Белого моря на примере Двинского залива // Матер. X Междунар. конф. “Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря”. Архангельск: ПИНРО, 2007. С. 38–42.
 5. *Лебедева Е.С.* Загрязнение шельфа морей России // Геоэкология шельфа и берегов морей России. М.: Ноосфера, 2001. С. 289–359.
 6. *Леонов А.В.* Моделирование природных процессов на основе имитационной гидроэкологической модели трансформации соединений С, N, P, Si: руководство пользователя // Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ, 2008. 168 с.
 7. *Леонов А.В., Пищальник В.М.* Анализ условий трансформации нефтяных углеводородов в морских водах и моделирование процесса в заливе Анива // Вод. ресурсы. 2005. Т. 32. № 6. С. 712–726.
 8. *Леонов А.В., Пищальник В.М., Чичерина О.В.* Моделирование загрязнения морской среды нефтяными углеводородами и их биотрансформации в водах Татарского пролива // Вод. ресурсы. 2010. Т. 37. № 2. С. 225–238.
 9. *Леонов А.В., Фащук Д.Я.* Биотрансформация нефтяных углеводородов в Каркинитском заливе Черного моря: оценка по результатам математического моделирования // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 3. С. 311–326.
 10. *Леонов А.В., Филатов Н.Н., Здоровеннов Р.Э., Здоровеннова Г.Э.* Функционирование экосистемы Белого моря: исследование на основе математической модели трансформации органогенных веществ // Вод. ресурсы. 2004. Т. 31. № 5. С. 556–575.
 11. *Леонов А.В., Филатов Н.Н., Здоровеннов Р.Э., Здоровеннова Г.Э.* Математическое моделирование условий функционирования экосистемы губы Чупа Белого моря: трансформация органогенных веществ и биопродуктивность морской среды // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 5. С. 589–614.
 12. *Леонов А.В., Филатов Н.Н., Чичерина О.В.* Трансформация органогенных веществ в экосистеме Белого моря: оценка по результатам математического моделирования // Вод. ресурсы. 2005. Т. 32. № 4. С. 435–451.
 13. *Леонов А.В., Чичерина О.В., Семеняк Л.В.* Математическое моделирование процессов загрязнения морской среды нефтяными углеводородами и их деградация в экосистеме Каспийского моря // Вод. ресурсы. 2011. Т. 38. № 6. С. 707–732.
 14. *Максимова М.П.* Сток биогенных элементов с речными водами Карельского побережья в Белое море // Гидробиологические исследования на Карельском побережье Белого моря. Л.: Наука, 1967. Сер. “Исследования фауны морей”. Т. VII (XV). С. 15–20.
 15. *Миронов О.Г., Миловидова Н.Ю., Шекатурина Т.А. и др.* Биологические аспекты нефтяного загрязнения морской среды. Киев: Наук. думка, 1988. 248 с.
 16. *Михайлов В.Н.* Устья российских рек и прилегающих стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
 17. *Немировская И.А.* Углеводороды в океане (снег–лед–вода–взвесь–донные осадки). М.: Науч. мир, 2004. 328 с.
 18. *Немировская И.А.* Углеводороды Белого моря (пути поступления, формы миграции, генезис) // Геохимия. 2005. № 5. С. 542–554.
 19. *Немировская И.А.* Органические соединения в снежно-ледяном покрове устья Северной Двины // Вест. АГУ. Сер. Прикладная геоэкология. 2008. № 74. С. 103–117.
 20. *Немировская И.А.* Углеводороды в воде, взвешях, сестоне и донных осадках Белого моря в конце летнего периода // Вод. ресурсы. 2009. Т. 36. № 1. С. 68–79.
 21. *Немировская И.А., Пересыпкин В.И., Новигатский А.Н.* Углеводороды в системе снег–лед–вода–донные осадки // Опыт системных океанологических исследований в Арктике. М.: Науч. мир, 2001. С. 256–264.
 22. *Немировская И.А., Шевченко В.П., Новигатский А.Н.* Органические соединения в снежно-ледовом покрове арктических районов // Матер. XVII Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии “Геология морей и океанов”. М.: ГЕОС, 2007. Т. III. С. 54–56.
 23. *Немировская И.А., Шевченко В.П., Новигатский А.Н., Филлипов А.С.* Содержание и состав взвеси и органических соединений в снежно-ледяном покрове Белого моря // Арктика и Антарктика. 2008. Т. 40. № 6. С. 108–122.
 24. *Никаноров А.М., Брызгалов В.А.* Реки России. Ч. II. Ростов-на-Дону: НОК, 2010. 296 с.
 25. *Патин С.А.* Нефть и экология континентального шельфа. М.: ВНИРО, 2001. 340 с.
 26. *Цыбань А.В., Симонов А.И.* Современные достижения в изучении процессов окисления нефти в море // Тр. ГОИН. 1978. Вып. 128. С. 5–27.
 27. AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme). AMAP assessment report: Arctic pollution issues. Oslo: AMAP, 1998. 859 p.
 28. *Evseev A.V., Belousova A.P., Ivanov V.V. et al.* Environmental hot spots and impact zones of the Russian Arctic. Moscow: UNEP, ACOPS, GEF PDF-B, 2000. Project № GF/1100–99–13. 51 p.
 29. IPIECA (International Petroleum Industry Environmental Conservation Association). A guide to contingency planning for oil spills on water (2nd edition). USA: IPIECA, 2000. 30 p.

30. Leonov A.V., Nemirovskaya I.A. Petroleum hydrocarbons in the waters of major tributaries of the White Sea and its water areas: a review of available information // Water Resources. 2011. V. 38. № 3. P. 324–351.
31. NAS (National Academy of Sciences). Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects. National Research Council. Washington, D.C.: The National Academies Press, 2003. 265 p.
32. Nemirovskaya I.A. Hydrocarbons in the System of the White Sea // Oceanology. 2003. V. 43. № 1 (Suppl.). S86–S99.
33. Nemirovskaya I.A., Novigatsky A.N., Kireeva L.I. Hydrocarbons in aerosols, water and bottom sediments of the White Sea. Seventh Workshop on Land Ocean Interactions in the Russian Arctic, LOIRA Project. Moscow: Shirshov Institute of Oceanology, 2004. P. 94–96.
34. Sources, Inputs, and Concentrations of Petroleum Hydrocarbons. Oslo: AMAP, 2007. Ch 4. 310 p.
35. Status Report on the marine environment of the Barents Region. The Joint Norwegian-Russian Commission on Environmental Cooperation. Oslo: Ministry of Environment, 1997. 97 p.