

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ МОРСКОЙ СРЕДЫ НЕФТЯНЫМИ УГЛЕВОДОРОДАМИ И ИХ ДЕГРАДАЦИИ В ЭКОСИСТЕМЕ КАСПИЙСКОГО МОРЯ<sup>1</sup>

© 2011 г. А. В. Леонов\*, О. В. Чичерина\*, Л. В. Семеняк\*\*

\*Институт океанологии Российской академии наук  
117997 Москва, Нахимовский просп., 36

\*Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии  
107140 Москва, ул. Верхняя Красносельская, 17

Поступила в редакцию 20.04.2010 г.

Исследованы имеющиеся данные наблюдений по загрязнению притоков и районов Каспийского моря углеводородами нефти и нефтепродуктами. Для оценки возможного поступления нефти из источников, расположенных в море, привлечены современные данные космических наблюдений за состоянием загрязнения поверхности моря нефтяными пленками. Гидроэкологическая CNPSi-модель применена для изучения процессов загрязнения вод (в десяти выделенных районах) Каспийского моря нефтяными углеводородами и их последующей биodeградации. В модельных расчетах внутригодовой динамики концентраций углеводородов нефти использованы среднемноголетние данные наблюдений за изменениями в течение года параметров водной среды (температура, освещенность, прозрачность воды), а также морфометрические параметры районов моря (площади, средние глубины, объемы водных ресурсов). Параметры водообмена между районами были вычислены на гидродинамической модели. По модельным расчетам охарактеризованы изменения в течение года концентраций углеводородов нефти, биомасс нефтеокисляющих бактерий, показателей их окислительной активности и биопroduкции, а также внутренние потоки углеводородов нефти (поступления из разных источников, перенос по горизонтали и вертикали, биотрансформация) в разных районах моря. По результатам расчетов составлены годовые балансы между процессами поступления и расходования углеводородов нефти для выделенных и укрупненных районов моря.

*Ключевые слова:* загрязнение вод притоков и районов моря нефтепродуктами; наблюдения со спутников; расчетная динамика концентраций нефтепродуктов; активность нефтеокисляющих бактерий; расчетные балансы нефтепродуктов по районам и укрупненным акваториям моря; модуль нагрузки по нефтепродуктам на морскую экосистему.

Основные поступления в Каспийское море загрязняющих веществ (ЗВ), включая нефть, нефтяные углеводороды и нефтепродукты (НП), происходят с речным стоком, со сбрасываемыми неочищенными промышленными и сельскохозяйственными стоками, коммунально-бытовыми сточными водами городов и поселков, расположенных на побережье, с атмосферными осадками, при дноуглубительных работах, судоходстве, разведке и эксплуатации морских нефтяных и газовых месторождений, транспортировке нефти танкерами, дампинге отходов, просачивании со дна из природных грязевых вулканов [10, 25, 38, 42, 49]. На загрязнение вод моря влияют также затопление и подтопление хозяйственно освоенных участков прибрежных территорий при подъеме уровня Каспийского моря [37].

Серьезным загрязнителем Каспия и прилегающих водных объектов по НП стали активно эксплуатируемый маломерный флот (катера, лодки с подвесными моторами), а также сточные воды судов (НП-содержащие хозяйственно-бытовые и подсланевые), обычно сбрасываемые за борт, аварии на скважинах и магистральных трубопроводах [3]. Загрязнение моря НП происходит также при подземном и подводном ремонте уже действующих скважин, аварийных разрывах нефтепроводов, необходимой очистке сбросных вод на нефтепромысловых и нефтеперерабатывающих предприятиях [38]. Потери НП при добыче, транспортировке и использовании достигают 2% общего объема. Количество аварий и повреждений нефтепроводов превышает 800 случаев в год по России при общей протяженности нефтепроводов 500 тыс. км (в среднем 1.6 аварийных ситуаций в год на 1000 км нефтепровода). Ежегодное увеличение аварийности составляет 5–9% [7].

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 08-05-00094; 09-05-13510-офи\_ц).

Загрязнение вод Каспийского моря за последние 40 лет возросло вследствие активной антропогенной деятельности на море и на его водосборной территории [49]. При повышенном интересе к добыче углеводородного сырья в Северном Каспии без эффективной системы экологической безопасности последствия для Каспия могут быть катастрофическими [46]. Замкнутость моря предопределяет повышенную опасность загрязнения водной среды и берегов НП и другими ЗВ. При этом загрязнение возможно не только путем сброса ЗВ в море, но и путем засорения его прибрежной полосы, которую море заливают при нынешнем подъеме его уровня [37].

Водный сток Волги, бассейн которой равен ~40% территории водосбора Каспия, составляет ~80–85% материкового речного стока, и волжские воды – главный источник поступления ЗВ для вод Северного Каспия [20, 25, 37]. В число основных ЗВ входят тяжелые металлы (ТМ), пестициды, фенолы, аммиак, поверхностно-активные вещества, НП, а также радиоактивные элементы, выносимые попутными нефтяными и термальными водами. Загрязнение вод Каспия фенолами и НП связано не только с поверхностным, но и с подземным стоком. Зоны разгрузки подземных вод глубинных горизонтов отличаются аномальным содержанием этих компонентов [8]. Известно, что фенолы и НП при совместном присутствии в воде ухудшают качество воды в большей степени, чем каждый из них в отдельности [3]. Для Каспийского моря установлена связь пятен НП на поверхности моря с подводными грифонами и грязевыми вулканами, обуславливающими разгрузку подземных флюидов (нефтей, газов, пластовых вод). Пятна НП появлялись над рядом локальных нефтегазоносных поднятий [18]. Поступающая из таких источников НП на поверхности моря образует пленки толщиной  $10^{-6}$ – $10^{-8}$  м, что указывает на выделение только легких ее фракций, которые подвергаются биодеградации [15].

На территории России в Каспийском регионе сосредоточено около 200 крупных городов с более 220-ю источниками промышленного загрязнения. Ежегодно в этом районе сбрасывается ~39 км<sup>3</sup> сточных вод, из которых ~8 км<sup>3</sup> загрязнены – содержат свыше 1000 химических соединений (включая токсичные), накапливающиеся в рыбе и гидробионтах [25, 28]. С территории РФ в Северный Каспий ежегодно поступает ~55 тыс. т НП, в том числе 35 тыс. т (65%) со стоком Волги и 130 т (2.5%) со стоком Терека и Сулака [28].

За 1986–1990 гг. поступление в Каспийское море НП с промышленными стоками, речными водами и при аварийных разливах составило соответственно 4.13–55.3 (среднее 20.86), 9.4–158 (99.88) и 0.03–0.35 (0.174) тыс. т [25]. По результатам анализа литературных данных построена табл. 1, в которой отражена динамика среднегодовых и максимальных

концентраций НП за 1990–2004 гг. в разных районах средней части моря.

### СОДЕРЖАНИЕ НП В ВОДЕ ОСНОВНЫХ ПРИТОКОВ МОРЯ

Главные притоки Каспийского моря – реки Волга, Урал, Терек, Сулак, Самур и Кура. Небольшой водный сток обеспечивается малыми кавказскими и иранскими реками. Имеющиеся в литературе сведения о содержании НП в воде главных притоков моря (нижняя часть рек и их дельтовые участки) достаточно разрозненны, а иногда даже противоречивы, для малых рек они практически отсутствуют. Использование различных аналитических методов оценки концентраций НП организациями и ведомствами, которые участвовали в изучении загрязнения речных вод по НП, объясняет имеющиеся противоречия в оценках содержания НП в речных и морских водах. Было решено в этом исследовании провести анализ имеющихся данных и оценить для выполнения модельных расчетов среднегодовые количественные показатели нагрузки по НП на экосистему Каспийского моря. Для речных вод бассейна Каспия в целом характерно двукратное превышение ПДК (0.05 мг/л) по НП [28].

**Река Волга.** Качество воды Нижней Волги определяется в целом высокой антропогенной нагрузкой и ухудшением экологического состояния вод малых рек-притоков [14], приносимых из вышерасположенных районов, а также поступлением в дельтовые участки значительных количеств ЗВ со сточными водами промышленных предприятий и служб коммунального хозяйства, вследствие интенсивного судоходства и аварийных ситуаций, влияния коллекторно-дренажных стоков предприятий сельского хозяйства [8, 10]. В бассейне Волги насчитывается ~6 тыс. контролируемых водовыпусков (или точечных источников загрязнения) [14]. За 1992 г. в водотоки Астраханской обл. со стоками промышленных предприятий и коммунального хозяйства сброшено 14.3 т НП; зафиксировано 19 случаев загрязнения речных вод водным транспортом: из-за аварий в водотоки попало 36.345 т НП (с ущербом на сумму 1006.3 тыс. руб) [10, 42]. По другим источникам из-за аварий плавсредств и других объектов в дельту Волги ежегодно попадает ~20 т НП [47]. Поступление ЗВ в Волгу со сточными водами Астраханской обл. за 1985–1990 гг. менялось в диапазоне 14.2–25 (среднее 19.08) т/год [45]. Выделение НП в волжскую воду из донных отложений на участке Волга–Бахтемир–Волго-Каспийский канал в среднеклиматический год в зимнюю межень, половодье и летнюю межень оценено в 5.9, 9.2 и 7.2 т соответственно [45].

В 1978–1992 гг. суммарное поступление НП в вершину дельты Волги составляло 70.5–87.2, а в 1998 г. – 69.3 тыс. т [20]. Количество ЗВ, ежегодно сбрасываемых в Каспийское море со стоком Волги,

**Таблица 1.** Содержание НП в разных районах Каспийского моря в 1990–2004 гг. (1993 г. – по Северному Каспию данные по разрезам II, III и Ша за август; по районам Баутино и Шевченко за февраль) [10–12, 21, 28, 41, 42]; 1 – концентрация, мг/л; 2 – доли ПДК; прочерк – отсутствие данных

Район, разрез	1990		1991		1992		1993		1994		1995		1996		2002		2003		2004		
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Весь район	Среднее	0.20	0.14	2.8	0.12	2.4	0.07	1.4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	Максимальное	1.62	1.14	22.8	1.02	20.4	0.48	9.6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Разрез о. Чечень– п-ов Мангышлак	Среднее	0.05	1.0	0.02	0.4	0.00	–	0.05	1.0	0.07	1.4	0.04	0.8	–	0.02	<0.5	0.05	1.0	0.04	0.8	
	Максимальное	0.28	5.6	0.68	13.6	0.01	0.2	0.12	2.4	0.12	2.4	0.07	1.4	–	0.05	1.0	0.06	1.2	0.06	1.2	
	Среднее	0.12	2.4	0.08	1.6	0.01	0.8	0.03	0.6	0.06	1.2	0.03	0.6	–	–	–	–	–	–	–	
	Максимальное	0.44	8.8	0.57	11.4	0.11	2.2	0.07	1.4	0.18	3.6	0.10	2.0	–	–	–	–	–	–	–	
	Среднее	0.07	1.4	0.06	1.2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Максимальное	0.30	6.0	0.24	4.8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–		
Северный Каспий																					
Средний Каспий																					
Датгстанское побережье																					
Мыс Лопатин	Среднее	0.17	3.4	0.01	0.2	0.00	–	0.04	0.8	0.06	1.2	0.03	0.6	0.04	0.8	0.07	1.4	0.06	1.2	0.04	0.8
	Максимальное	0.70	14.0	0.06	1.2	0.02	0.4	0.10	2.0	0.22	4.4	0.07	1.4	0.05	1.0	0.26	5.0	0.15	3.0	0.06	1.2
Взморье р. Терек	Среднее	0.12	2.4	0.01	0.2	0.01	0.2	0.03	0.6	0.05	1.0	0.04	0.8	0.03	0.6	0.07	1.4	0.08	1.6	0.06	1.2
	Максимальное	0.49	9.8	0.03	0.6	0.02	0.4	0.07	1.4	0.27	5.4	0.10	2.0	0.05	1.0	0.24	4.8	0.17	3.0	0.09	1.8
Взморье р. Сулак	Среднее	0.15	3.0	0.00	–	0.02	0.4	0.02	0.4	0.06	1.2	0.04	0.8	0.04	0.8	0.03	0.6	0.05	1.0	0.04	0.8
	Максимальное	0.42	8.4	0.03	0.6	0.33	6.6	0.15	3.0	0.21	4.2	0.07	1.4	0.07	1.4	0.06	1.2	0.25	5.0	0.08	1.6
Махачкала	Среднее	0.13	2.6	0.02	0.4	0.02	0.4	0.04	0.8	0.06	1.2	0.06	1.2	0.05	1.0	0.03	0.6	0.08	1.6	0.06	1.2
	Максимальное	0.45	9.0	1.00	20.0	0.30	6.0	0.12	2.4	0.16	3.2	0.25	5.0	0.06	1.2	0.11	2.2	0.17	3.4	0.12	2.4
Каспийск	Среднее	0.15	3.0	0.01	0.2	0.01	0.2	0.03	0.6	0.05	1.0	0.04	0.8	0.03	0.6	0.06	1.2	0.12	2.4	0.03	0.6
	Максимальное	1.06	21.2	0.08	1.6	0.10	2.0	0.07	1.4	0.15	3.0	0.08	1.6	0.05	1.0	0.13	2.6	0.31	6.2	0.05	1.0
Избербаш	Среднее	0.20	4.0	0.01	0.2	0.02	0.4	0.04	0.8	0.08	1.6	0.04	0.8	0.02	0.4	0.09	1.8	0.08	1.6	0.04	0.8
	Максимальное	1.43	28.6	0.02	0.4	0.35	7.0	0.13	2.6	0.21	4.2	0.08	1.6	0.05	1.0	0.41	8.2	0.18	4.3	0.06	1.2
Дербент	Среднее	0.11	2.2	0.01	0.2	0.00	–	0.04	0.8	0.05	1.0	0.04	0.8	0.02	0.4	0.13	2.6	0.08	1.6	0.06	1.2
	Максимальное	0.49	9.8	0.02	0.4	0.00	–	0.05	1.0	0.13	2.6	0.08	1.6	0.03	0.6	0.41	8.2	0.16	3.2	0.10	2.0
Взморье р. Самур	Среднее	0.08	1.6	0.01	0.2	0.00	–	0.02	0.4	0.04	0.8	0.04	0.8	0.04	0.8	0.06	1.2	0.07	1.4	0.04	0.8
	Максимальное	0.26	5.2	0.02	0.4	0.00	–	0.04	0.8	0.09	1.8	0.08	1.6	0.05	1.0	0.19	3.8	0.19	3.8	0.10	2.0
Восточное побережье																					
Баутино	Среднее	0.11	2.2	0.04	0.8	0.03	0.6	0.03	0.6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	Максимальное	0.34	6.8	0.28	5.6	0.37	7.4	0.10	2.0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Шевченко (ныне Актау)	Среднее	0.16	3.2	0.002	0.04	0.01	0.2	0.05	1.0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	Максимальное	0.84	16.8	0.04	0.8	0.12	2.4	0.13	2.6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

составляет ~60 млн. т [43], а НП — десятки тыс. т [45]. Из Астрахани в Северный Каспий со стоком Волги поступает ~150–170 тыс. т НП [49].

В 1980-е гг. водоемы дельты Волги характеризовали как умеренно загрязненные. Качество вод по индексу сапробности было в пределах 2.0–2.4, а по биотическому индексу — 6–7. С 1988 г. качество воды ухудшилось, из ее микробного сообщества начали исчезать олигосапробные виды и появились β- и α-β-сапробы. С 1991 г. стали доминировать α-β-сапробные виды, вода сделалась умеренно загрязненной, а к 2000 г. — близкой к грязной с переходом к сильно и весьма загрязненной. При этом состояние водных экосистем характеризовалось “...антропогенным напряжением с элементами экологического регресса...” [27].

В 1987–1990 гг. среднегодовые концентрации НП в волжской воде составили 9–14 ПДК (Верхнее Лебяжье), 7–9 (Астрахань), 18 (рук. Бахтемир, пос. Алгаза) и 8–14 ПДК (рук. Камызяк). Неоднократно фиксировались случаи высокого загрязнения (ВЗ) и экстремально высокого загрязнения (ЭВЗ) волжских вод: в 1987 г. — 22 случая ВЗ, в 1988 г. — 12 случаев ВЗ и 2 случая ЭВЗ (159 и 138 ПДК) соответственно в районе с. Верхнее Лебяжье (11 марта) и в Астрахани (29 августа). В 1989 и 1990 гг. отмечено соответственно 15 и 21 случай ВЗ (из последних — 17 случаев на Волге в районе Астраханского промышленного комплекса) [6].

В 1989–1990 гг. максимальные концентрации НП (15–25 ПДК) фиксировали на взморье Волги [25]. В 1990-е гг. содержание НП в волжской воде превышало ПДК в 8–60 раз [25, 28]. В 1990 и 1992 гг. отношение содержания в воде НП к ПДК на отдельных участках дельты Волги составляло соответственно 5 и 7 [1]. За 1973–1992 гг. содержание НП в волжской воде составляло в среднем 5–7 ПДК, а в 1998 г. — 2–4 ПДК. Однако в водотоках дельты Волги содержание НП было более высоким (в среднем 7 ПДК), а наиболее загрязненными оставались Волго-Каспийский канал и расположенный восточнее его Гандуринский банк [20].

В 1995–2004 гг. средняя концентрация НП в водах Нижней Волги составила 0.20 мг/л. В вершине дельты Волги и в водотоках верхней зоны, ответвляющихся от Волги (в том числе рук. Бузан в восточной части дельты), содержание НП в I–IV кварталах составляло в среднем 0.23, 0.24, 0.1 и 0.27 (среднее за год 0.21) мг/л. В р. Ахтубе и в ее продолжении (проток Кигач) эти концентрации НП составляли 0.18, 0.16, 0.13 и 0.19 (среднее за год 0.16) мг/л [45].

В последние годы произошло снижение концентраций НП в устье Волги. В сентябре 2001 г. на разных участках дельты Волги (р. Бузан–Астрахань, Главный банк, Белинский банк) концентрации НП менялись в пределах 7.7–15.7 (средняя 10.7) мкг/л [36], в августе 2007 г. в водах дельты Волги — 0.01–0.03 (0.018 ± 0.006) мг/л, а в августе 2009 г. в водах пе-

ред Астраханью и вблизи с. Новое Икрыное — соответственно 39.2 и 38.8 мкг/л [40].

Основная особенность сезонной изменчивости концентрации НП — наблюдаемое практически во всех районах дельты Волги ее снижение к концу лета и существенное повышение в осеннюю межень (IV квартал). В сравнении с колебаниями во времени, изменчивость концентраций НП по пространству дельты выражена слабее. Исключение — заметное снижение в осеннюю межень концентраций НП в основных водотоках западной части дельты в направлении от верхней ее зоны к морскому краю [45].

**Р. Урал.** В Каспийское море Урал ежегодно приносит ~8 км<sup>3</sup> воды, а около четверти его суммарного стока теряется на 800-км участке транзита реки через прикаспийские полупустыни и пустыни. В целом сток реки отличается своей неравномерностью. Большая часть водного питания реки приходится на атмосферные осадки, незначительная — на дренирование подземных вод. Зарегулированность стока реки привела к начавшимся процессам ее обмеления и евтрофирования водоемов, которые в сочетании с избыточным загрязнением большинства водных объектов Уральского бассейна вызвали серьезные экологические изменения [5]. Сток Урала — один из источников загрязнения моря большими объемами промышленных, бытовых и естественных стоков [8]. Ежегодно со стоком Урала в Каспийское море поступает 2.5 млн. т ЗВ [43].

Большое влияние на химический состав воды р. Урала оказывает сброс загрязненных промышленных и коммунальных вод в городах Орске, Новотроицке, Оренбурге и других, поэтому вода в реке классифицируется как сильно загрязненная [5]. За 1996–2000 гг. в водные объекты Оренбургской обл. с недостаточно очищенными сточными водами (большая их часть приходится на предприятия нефтехимии, добычи и переработки газа, металлургической промышленности, сельскохозяйственных предприятий и других) вместе с другими ЗВ поступало соответственно 52.7, 46.5, 56.1, 32.6 и 30.42 тыс. т НП. Следует отметить, что в Оренбургской обл. выявлено 15 стабильных источников загрязнения подземных вод, в которых НП — основные ЗВ [5].

В воде рек Уральского бассейна в районе Оренбурга содержание НП, мг/л, составляло 0.58 ± 0.03 (р. Черная), 1.9 ± 0.1 (р. Каргалка), 0.40 ± 0.02 (р. Сакмара), а в воде р. Урала, поступающей в Каспийское море, оно было в пределах 0.12 ± 0.01 мг/л [5].

Средние концентрации НП для среднеклиматического года за 1978–1992 гг. на граничных станциях между отмелым и приглубым взморьем р. Урала для зимы, весны, лета и осени составляют соответственно 0.09, 0.14, 0.19 и 0.05 (средняя за год 0.118) мг/л [47].

**Р. Терек.** Устьевая область Терека (а также Сулака) и прибрежная зона Каспия (от о. Чечень до Ма-

хачкалы, включая южную часть современного Кизлярского зал.) — районы с едиными процессами дельтообразования и изменениями гидрографической сети, которые происходят здесь с большей интенсивностью, чем в устьях других впадающих в море рек. Это объясняется высокой мутностью рек, отмелостью устьевых взморьев и интенсивным антропогенным влиянием в бассейнах данных рек [25]. С водами Терека и через сбросные каналы происходит вынос разных ЗВ (включая токсичные для гидробионтов) в северо-западные прибрежные районы моря [24].

В 1998 г. (и в предыдущие пять лет) биоконтроль терской воды выявил ее природную токсичность для дафний: за 36 ч погибало 25% особей. При более длительном контакте (30 сут) гибель особей в эксперименте достигала 40%, также погибали 40% молоди. Разбавление 1 : 1 приостанавливает их гибель в опытах острой экспозиции, а в хроническом эксперименте снижает ее до 25%, однако плодовитость самок остается ниже на 25% в сравнении с контролем. При разбавлении 1 : 2 выживаемость рачков повышается до уровня контроля (10%) и сохраняется в норме плодовитость самок [22].

В 1999 г. в р. Терек и ее притоки было сброшено 312 т ОВ, 14 т НП, 7 т синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ) и 258 т взвешенных веществ. Количество ЗВ, ежегодно сбрасываемых в Каспийское море со стоком Терека, оценивается в 3 млн. т. В последнее десятилетие наблюдается устойчивая тенденция к ухудшению качества терской воды [43], а также увеличению объема поступлений ЗВ (особенно НП) в Каспийское море со стоком Терека. Это обусловлено разрушением предприятий нефтяной и нефтеперерабатывающей промышленности в среднем течении реки [37], а также систем очистки в районах добычи и переработки нефти [24]. В водоемах-отстойниках скопились сотни тонн НП, которые периодически сбрасываются в р. Сунжу и из нее попадают в Терек [24].

В 1990 и 1992 гг. в устье Терека отношение содержания в воде НП к ПДК составляло 8 и 0.2 соответственно [1]. Однако среднее содержание НП в 1992 и 1993 гг. не изменилось и составило <1 ПДК [10, 11], а воды за 1991–1993 гг. в устьевой зоне и на взморье Терека классифицировались как грязные [10, 11, 42].

В 1993 г. среднее содержание НП в терской воде составило 0.6 ПДК, а в 1994 г. оно выросло до 1 ПДК, а качество воды в целом несколько улучшилось (до градации загрязненные) [12]. Однако в 1995 г. загрязненность вод Терека по НП возросла: среднее содержание в реке составило 22 ПДК при фиксированных максимальных значениях 140 ПДК, а на взморье в течение года постоянно отмечались концентрации 5–7 ПДК [24]. В экологических сводках отмечается регулярное превышение нормы на со-

держание НП в водах устья Терека и прибрежных морских водах в 5–10, а фенолов — в 4–7 раз [3].

Анализ данных по содержанию НП в пробах из различных участков р. Терека (Кизлярский, Бабаюртовский мосты, устье р. Терека и прибрежная зона) показывает, что концентрации НП значительно различаются между собой в зависимости от сезона года, они также сильно меняются в летний период. Содержание НП у Кизлярского моста в 4 раза выше, чем на взморье р. Терека (37.96–9.45 мг/л или 759–189 ПДК). Содержание НП в городских сточных водах увеличивается, а в среднем за сутки в сбросах оно составляет 6.8 мг/л (при колебаниях 120–160 ПДК). При снижении сбросов сточных вод нефтедобывающей и нефтехимической промышленности в р. Терек среднегодовая концентрация НП в устье реки уменьшалась до 1 ПДК. Такая же тенденция наблюдалась в целом по Дагестанскому побережью Каспийского моря [44].

В 1998 г. произошло существенное снижение загрязнения по НП вод р. Терека и ее предустьевой зоны. В предыдущие 3–4 года в терских водах периодически фиксировались концентрации НП до 100 ПДК, а в 1998 г. их среднее содержание в воде р. Терека снизилось до 2–3 ПДК, хотя изредка фиксировались концентрации НП до 30 ПДК (в связи с авариями на заводе в Грозном). В донных осадках наибольшее содержание НП фиксировалось летом, максимум (62.0 мг/кг) был обнаружен в осадках Терека, в остальных водных системах в разные сезоны года оно колебалось в пределах 15–30 мг/кг. В водах крайновского побережья, Кизлярском зал. и в сбросных каналах содержание НП составляло, как правило, 1–2 ПДК [22].

В 2002–2004 гг. среднегодовые концентрации НП на взморье Терека оценивались в пределах 0.06–0.08 (или 1.2–1.6 ПДК), а максимальные — до 0.09–0.24 мг/л (1.8–4.8 ПДК) (табл. 1).

**Р. Сулак.** В 1990 и 1992 гг. отношение содержания в воде НП к ПДК составляло 8 и 0.5 соответственно [1]. В 1992–1993 гг. содержание НП в воде реки составляло 0.4 ПДК. Максимум 3 ПДК был отмечен в марте 1993 г. По общему содержанию химических веществ в реке и на участке ее взморья воды классифицировались как грязные [10, 11, 42]. В 1994 г. среднее содержание НП в водах реки возросло до 1.2 ПДК (максимум 4 ПДК был отмечен в мае), а в целом воды района характеризовались как загрязненные [12].

В 1998 г. биотестированием установлено, что вода сбросных коллекторов и р. Сулака не токсична для дафний как в опытах острой, так и хронической экспозиции. Показатели жизнестойкости (гибель в пределах 5–10%) и плодовитости особей были сопоставимы с контрольными организмами. Аналогичные данные по жизнестойкости зоопланктонных организмов были получены в прошлые годы при биотестировании воды р. Сулака [22].

В воде на взморье Сулака в 1994–2004 гг. среднегодовые концентрации НП менялись в пределах 0.03–0.06 мг/л (или 0.6–1.2 ПДК), максимальные концентрации НП в 1995, 1996, 2002, 2004 гг. составляли 0.06–0.08 мг/л (1.2–1.6 ПДК), а в 1994 и 2003 гг. достигали 0.21–0.25 мг/л (или 4.2–5.0 ПДК) (табл. 1).

**Р. Самур.** В 1990 и 1992 гг. отношение содержания НП в воде р. Самура к ПДК составляло 1.5 и 0.2 соответственно [1]. В 1992 г. воды реки классифицировались как загрязненные [10]. В 1993 г. среднее (за февраль, март, октябрь) содержание НП составляло 0.4 ПДК (вода характеризовалась как грязная) [11], а в 1994 г. оно возросло до 0.8 ПДК (загрязненная) [12].

Среднегодовые концентрации НП в воде на взморье Самура подвержены некоторым колебаниям: в 1990–1992 гг. они снижаются с 0.08 мг/л до нуля, к 1993 г. – возрастают до 0.02 мг/л, в 1994–1996 гг. – сохраняются неизменными (0.04 мг/л), в 2002–2003 гг. – увеличиваются до 0.06–0.07, а в 2004 г. – снижаются до 0.04 мг/л. Наибольшие максимальные концентрации НП отмечались в 1990 г. (0.26 мг/л или 5.2 ПДК) и в 2002–2003 гг. (0.19 мг/л или 3.8 ПДК), в 2004 г. отмечено снижение концентрации НП до 0.1 мг/л (2 ПДК) (табл. 1).

**Р. Кура.** Оценка качества поверхностных вод в бассейне р. Куры, выполненная на основе комплексных формализованных коэффициентов, показала, что загрязненность воды р. Куры и ее притоков неоднородна по пространству и во времени, имеет ряд особенностей и закономерностей. Диапазон колебаний загрязненности воды водотоков в целом по бассейну широк и характеризуется удельным комбинаторным индексом загрязненности воды от значений  $<1$  до  $>7$  и наличием в бассейне речных вод всех пяти классов качества. Наиболее характерны воды 3-го и 4-го классов (загрязненные и грязные). Качество воды в этом районе определяется содержанием фенолов, соединений Си, реже нитритного и аммонийного N, НП, на локальных участках рек – соединениями Zn, Cr, Ni, легкоокисляемыми органическими веществами (по БПК<sub>5</sub>) и сульфатами. 34% рек бассейна (Кура, Сарамула, Вера, Машавера, Беюк-Чай, Ахурян, Карангу, Севджур и др.) были загрязнены НП [13].

Количество ЗВ, ежегодно поступающих в Каспийское море со стоком Куры, составляет 1.5 млн. т [43], а вынос речными водами НП в море возрастает [37]. В 1990 г. максимум содержания НП (36 ПДК) был отмечен на взморье Куры, а среднее их содержание в прибрежных водах составляло 5 ПДК [41].

#### СОДЕРЖАНИЕ НП В РАЗНЫХ РАЙОНАХ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Одной из самых загрязненных частей Каспийского моря – наиболее биологически продуктивная северная его часть. Это во многом объясняется ка-

чеством стока впадающих рек, которые вместе с растворенными питательными веществами приносят в море также большое количество ЗВ из промышленных и сельскохозяйственных районов. Ассортимент ЗВ преимущественно представлен НП, фенолами, ТМ, пестицидами и другими реагентами [43]. Отмечено значительное ухудшение качества вод Северного Каспия за последние 20 лет [49].

Загрязненность вод западного побережья Северного и Среднего Каспия определяется поступлением ЗВ с промышленными и сельскохозяйственными стоками–отходами; с водами рек–притоков, содержащими значительные количества различных ЗВ; аэральными потоками; отходами дизельных двигателей морских судов [24], а также периодическим затоплением нефтегазопромислов на побережье Северного Каспия [25]. В некоторых районах Среднего и Южного Каспия загрязнение вод НП происходит вследствие выбросов действующих здесь грязевых вулканов [25].

Каспийское море – обширный водный бассейн, и антропогенная нагрузка на различные его акватории варьирует в широких пределах, поэтому состояние загрязнения его вод следует проводить для каждого района отдельно [42]. По мере снижения загрязнения районов Каспийского моря НП их можно расположить в следующей последовательности: Восточное побережье > Дагестанское побережье > Северный и Средний Каспий [28]. Наиболее загрязненные локальные акватории моря – район “Нефтяных Камней”, а также заливы Красноводский и Туркменский [37]. Район “Нефтяных Камней” характеризуется сильной неоднородностью загрязнения, связанного с различием толщины и активности нефтяных пленок [4].

**Северный Каспий.** В этой части моря встречаются наиболее высокие концентрации НП: среднее их содержание здесь находится в пределах 0.07–0.20, а максимальное – 0.25–1.54 мг/л [2, 39]. Среднегодовое содержание НП в водах Северного Каспия за 1985–1988 гг. – 1 ПДК, в 1989 и 1990 гг. – 3 и 4 ПДК, за 1985–1990 гг. составляло 1–4 ПДК (0.07–0.21 мг/л [25]). В ноябре 1989 г. наибольшие концентрации НП были измерены в районе воздействия стока Волги – между 0.74–0.82 мг/л (15–16 ПДК), а в открытой западной части моря они составляли 0.08–0.48 мг/л (2–10 ПДК). В 1990 г. загрязнение моря НП было наибольшим: 32 и 30 ПДК на двух наиболее глубоких станциях, выполненных соответственно 4 марта и 7 июля [49]. В западной части Северного Каспия в августе 2007 г. на поверхности содержание НП было в пределах 0.06–0.36 (среднее  $0.12 \pm 0.07$ ), а у дна – 0.03–0.24 ( $0.08 \pm 0.04$ ) мг/л [40].

Загрязнение меняется по сезонам, мг/л: увеличивается от 0.007 зимой до 0.09–0.16 (2–3 ПДК) летом и до 0.23 (5 ПДК) осенью. Во время полного замерзания Северного Каспия в 1990 г. концентрация загрязнений была наибольшей (6 ПДК), однако за-

тем — летом—осенью она снизилась до 3 ПДК. Среднегодовая концентрация в разных районах Северного Каспия менялась мало — в пределах 0.12–0.16 мг/л (2–3 ПДК). Однако во время полного замерзания поверхности моря в 1990 г. эти значения достигали 11 и 3–5 ПДК в районе влияния р. Урала и западной части соответственно [49]. В 1989–1990 гг. максимальные концентрации НП чаще фиксировали в восточной части Каспия (15–25 ПДК), а минимальные — на Мангышлакском пороге [25]. Отмеченные максимальные значения концентраций НП в водах Северного Каспия в 1990 и 1991 гг. составляли 1.62 и 1.14 мг/л (или 32 и 23 ПДК) соответственно [28].

Наибольшее поступление НП в море в 1990 г. происходило в основном с речным стоком — 145540 т (со сточными водами — 4134 т), поэтому прибрежные районы моря были сильно загрязнены (средние концентрации НП составили 5 ПДК) [41]. Повышенные концентрации НП в западных районах моря связывались с высоким (более чем в 2 раза) поступлением НП со стоком Волги [25].

В 1990 г. среднегодовые концентрации НП в отдельных районах моря составили: на побережье Дагестана 3–7 ПДК; Азербайджана 2–5 (в бух. Баку — 7); Сумгаита 5; восточное побережье (вблизи портов Шевченко и Бекдаш) 4–6 ПДК [41], а максимальное содержание НП (11 ПДК) было отмечено в период ледостава в районе Уральской бороздины [25].

В 1991 г. на 1 км<sup>2</sup> акватории Каспийского моря приходилось 60 л сбрасываемых достаточно грязных сточных вод. Количество НП, поступивших в 1991 г. со сточными водами в Каспийское море, составляло 6920 т, а с речным стоком — 55990 т (со стоком Волги — 54720 т). Среднегодовая и максимальная концентрации НП в водах Северного Каспия в 1991 г. принимались равными 3 и 23, на взморье Махачкалы <1 и 20, а на взморье Дербента <1 и <1 мг НП/л соответственно [48].

В 1992 г. загрязненность акваторий Каспийского моря, прилегающих к территории России, в целом снизилась (очевидно, из-за сокращения поступления НП со стоком Волги и снижения хозяйственной деятельности). Однако в большинстве районов моря в 1992 г. сохранялась тенденция к ухудшению качества вод, а состояние их загрязнения и экологическая ситуация в юго-западных районах Каспия служили ярким примером интенсивной антропогенной нагрузки на прибрежную зону моря [42]. Среднее содержание НП составляло 2.4 ПДК. Наиболее высокое содержание НП отмечено в августе 1992 г. — в среднем 4 (поверхность) и 5 ПДК (придонный горизонт) [10]. В этот период наиболее загрязненными были районы взморья Волги (до 6–9 ПДК), Астраханского промышленного рейда (18), о. Кулалы (до 13) и район свала глубин (до 20 ПДК) [10]. По химическим показателям 1992 г. воды восточной части Северного Каспия, центральной и

юго-западной зоны западной части Северного Каспия классифицировались как загрязненные, воды Мангышлакского порога, прибрежной зоны Махачкалы, Каспийска, Избербаша и Баутино — как грязные [10, 42].

В августе 1993 г. среднее содержание НП в водах Северного Каспия составило 1.4 ПДК. Наиболее высокая загрязненность (10 ПДК) отмечена в устье Волги (район Волго-Каспийского канала), а в среднем и в придонных горизонтах — 4 ПДК. В этот период воды центрального и юго-центрального районов западной части Северного Каспия характеризовались как умеренно загрязненные — грязные [11].

В 1998 г. содержание НП в водах Северного Каспия возросло в 4.3 раза в сравнении с предыдущим годом и было в 1.2 раза выше, чем в речной воде. Наиболее загрязненной была приглубая зона западной части Северного Каспия (особенно мелководная зона на востоке, прилегающая к взморью р. Урала, где содержание НП достигало 20 ПДК). В сентябре был выявлен еще один район значительного содержания НП (25 ПДК) — в северо-западной части вблизи дельты Волги [20]. По результатам летней съемки 1998 г. наименьшие концентрации НП отмечались в районе о. Тюлений (0.06–0.11 мг/л), а также в районе островов Укатный и Кулалы (0.05 и 0.08 мг/л). Нефтяное загрязнение вод Северного Каспия на большей части его акватории составляло от 1 до 6 ПДК [38].

**Средний Каспий.** Обширный спектр ЗВ, присутствующих в водах Среднего Каспия, определяется сбросами в прибрежные воды моря сточных вод, ежегодный объем которых составляет ~800 млн. м<sup>3</sup>. На протяжении последних 5–10 лет в море ежегодно сбрасывается, т: НП до 30, сульфатов до 30 тыс., фосфатов >1300, нитратов >700, СПАВ 13–14, Fe ~50 тыс. Все эти вещества аккумулируются в прибрежных водах, грунтах, водной растительности, кормовых объектах и в рыбе [24]. В некоторых районах Среднего Каспия загрязнение вод НП связано также с выбросами действующих здесь грязевых вулканов [25].

В 1988 г. содержание НП в водах Среднего Каспия изменялось в пределах 0–0.28 мг/л (до 5.6 ПДК) [28], в 1989 г. по всей акватории (особенно в центральной части) оно возросло до 2.8–5.6 ПДК [9, 25]. В 1990 г. основная масса растворенных в воде НП приходилась на южную часть Среднего Каспия [23].

В прибрежных водах содержание НП колебалось от 1.5 (1989 г.) до 4–5 ПДК (1990 г.), в 1991 г. оно снизилось до 1 ПДК, в 1992 г. возросло до 4–5 ПДК, к 1994 г. — отмечалось постепенное устойчивое снижение до 1 ПДК. В 1995 г. среднегодовое содержание НП находилось в пределах 1–3 ПДК [24]. В 1998 г. в водах Среднего Каспия отмечалась вполне низкая и стабильная концентрация НП в пределах 1–2 ПДК [22].

В большей мере подвержены загрязнению воды западной части Среднего Каспия. В районах Дербент–Дивичи–Килизи увеличение количества НП наблюдалось при продвижении с севера на юг – с 0.3 (6 ПДК) (район Дербента) до 0.8–0.7 мг/л (16–14 ПДК) (разрез Килизи–о. Жилой). Среднегодовое содержание НП в районе о. Макарова и Камня Игнатия не превышало 4–6 ПДК, а на Куринском взморье – 4–5 ПДК [23].

В 1998 г. результаты проведенных исследований показали, что воды Среднего Каспия в целом мало загрязнены НП. В водах на разрезе Дивичи–Кендырли (центральная часть Среднего Каспия) концентрации НП варьировали в пределах 0.03–0.09 мг/л (<2 ПДК), однако на одной станции в поверхностных водах было фиксировано 0.2 мг/л (4 ПДК) [22].

Динамику изменения загрязненности вод Среднего Каспия можно проследить по результатам ряда наблюдений на двух разрезах (о. Чечень–п-ов Мангышлак и Махачкала–м. Сагындык).

**Разрез о. Чечень–п-ов Мангышлак.** В 1992 г. среднее содержание НП было близко к аналитическому нулю [10], в 1993 г. (по данным за февраль и октябрь) содержание НП возросло до 1 ПДК [11], в 1994 г. (ноябрь) – до 1.4 ПДК [12], в 1995 г. снизилось до 0.8 ПДК (табл. 1). В 1992–1993 гг. воды разреза классифицировались как грязные, а в 1994 г. – как умеренно загрязненные [10, 11]. В 1998 г. содержание НП в воде составляло 0.0–0.08 мг/л (<2 ПДК), причем не обнаруживалось существенной разницы в содержании НП в вертикальном распределении в водах западного и восточного побережий [22]. В 2002–2004 гг. среднее содержание НП составляло <0.5–1.0 ПДК, а максимальные их концентрации были в пределах 1.0–1.2 ПДК (табл. 1).

**Разрез Махачкала–м. Сагындык.** В 1991 г. среднее содержание НП в водах по разрезу составляло 1.6 ПДК, в 1992 г. – снизилось до 0.8 ПДК [10], в 1993 г. (данные за февраль и октябрь) – возросло до 0.6 ПДК [11], в 1994 г. – до 1.2 (максимум – до 2 в придонном слое) ПДК [12], а в 1995 г. – упало до 0.6 ПДК (табл. 1). Максимальные значения (8.8–11.4 ПДК) отмечались в 1990–1991 гг., в 1992–1995 гг. – в пределах 1.4–3.6 ПДК (табл. 1). За 1992–1994 гг. воды классифицировались как загрязненные [10–12]. В 1998 г. содержание НП было близким к 1 ПДК [22].

Наибольшая степень загрязнения вод НП характерна для юго-западной части Среднего Каспия, граничащей с северо-западной акваторией Южного Каспия [23]. К северу от этой акватории результаты исследований 1998 г. показали относительную стабилизацию загрязнения вод по НП. Следует отметить, что ряд локальных участков на побережье Дагестана подвержен повышенной антропогенной нагрузке [22].

**Дагестанское побережье Каспийского моря.** В этой части побережья Каспийского моря (дельта Волги, Северный Каспий, устье Терека) экологическая ситуация может классифицироваться как чрезвычайная [1]. В Дагестане уже давно нормально не функционирует ни одно из городских очистных сооружений, ни на одном предприятии нет локальной очистки сточных вод, а удельный вес нормативноочищенных сточных вод в общем их объеме составляет лишь 1%. К числу наиболее распространенных ЗВ, попадающих в прибрежную зону моря, относятся фенолы и НП. За год с территории Дагестана в водоемы и бассейн Каспия сбрасывается >5 млн. т геотермальных и 1.5 млн. т пластовых нефтяных вод с превышением ПДК на содержание фенола в 1000 и более раз [3].

Вдоль Дагестанского побережья концентрации НП в морской воде находились в пределах 0–0.34 мг/л (до 6.8 ПДК), максимальные значения были отмечены в 1989 г. и составили 1.63 и 1.81 мг/л (33 и 36 ПДК соответственно) [28].

Проследим динамику загрязнения морских вод побережья Дагестана за 1990–2004 гг. по отдельным прибрежным районам (м. Лопатин, города Махачкала, Каспийск, Избербаш, Дербент).

**Район м. Лопатин.** С 1990 до 1992 гг. среднее содержание НП снизилось с 3.4 ПДК до аналитического нуля [10], в 1993 г. (данные за январь, март, октябрь) оно возросло до 0.8 (максимум 1.2 ПДК в октябре) [11], в 1994 г. (январь, март, май, июль, сентябрь, октябрь) – до 1.2 ПДК (максимум 1.6 ПДК в мае) [12]. Морские воды в 1992–1993 гг. классифицировались как загрязненные, в 1994 г. – как грязные [10–12]. В 1995–1996 и 2004 гг. средние концентрации НП составляли 0.6–0.8 ПДК, в 2002–2003 гг. – 1.2–1.4, а максимальные – 3.0–5.0 ПДК (табл. 1).

**Район г. Махачкалы.** В 1991–1992 гг. среднее содержание НП в морских водах составляло 0.4 ПДК [10], в 1993 г. (данные за февраль, март и октябрь) – оно возросло до 0.8 ПДК (максимум 2 ПДК – в поверхностном слое в октябре) [11]. Морские воды в этом районе в 1992 и 1993 гг. классифицировались соответственно как загрязненные и грязные [10–12]. В 1994–1996 гг. средние концентрации НП были в пределах 1.0–1.2 ПДК (максимальные – до 3.2–5.0 ПДК), в 2003–2004 гг. средние возросли до 1.2–1.6 ПДК, а максимальные – составляли 2.4–3.4 ПДК (табл. 1).

**Район г. Каспийска.** В 1991–1992 гг. среднее содержание НП было всего 0.2 ПДК [10], в 1993 г. оно возросло до 0.6 ПДК (максимум – 1.2 ПДК в поверхностном слое в марте) [11], в 1994 г. – до 1 ПДК (максимум – 3 ПДК в январе на поверхности и у дна) [12]. В 1992–1993 гг. морские воды этого района классифицировались как грязные, а в 1994 г. – как загрязненные [10–12]. В 1995–1996 и 2004 гг. средние концентрации НП составляли 0.6–



0.8 (максимальные – 1.0–1.6) ПДК, а в 2002–2003 гг. среднее содержание было 1.2–2.4, максимальные значения – 2.6–6.2 ПДК (табл. 1).

**Район г. Избербаш.** В 1991–1992 гг. среднее содержание НП составляло 0.2–0.4 ПДК [10], в 1993 г. (данные за февраль, март и октябрь) оно возросло до 0.8 ПДК (максимум – 3 ПДК в придонном слое в октябре) [11], в 1994 г. выросло до 1.6 ПДК (максимум – 4 ПДК в поверхностном слое в марте) [12]. В 1992–1993 гг. морские воды этого района классифицировались как грязные, а в 1994 г. – как загрязненные [10–12]. Средние концентрации НП в 1995–1996 и в 2004 гг. менялись в пределах 0.4–0.8 (максимальные – 1.0–1.6) ПДК, в 2002–2003 гг. среднее содержание возросло до 1.6–1.8, а максимальные значения – до 4.3–8.2 ПДК (табл. 1).

**Район г. Дербента.** В 1992 г. среднее содержание НП было близко к аналитическому нулю [10], в 1993 г. (данные за февраль, март и октябрь) оно возросло до 0.8 ПДК [11], в 1994 г. – до 1 ПДК [12]. В 1992–1993 гг. морские воды этого района классифицировались как загрязненные, а в 1994 г. – как грязные [10–12]. В 1995–1996 гг. средние концентрации НП менялись в пределах 0.4–0.8 (максимальные – 0.6–1.6) ПДК, а в 2002–2004 гг. содержание в среднем возросло до 1.2–2.6, а максимальные значения – до 2.0–8.2 ПДК (табл. 1).

**Восточное побережье.** Основная особенность восточного побережья Каспия – практически полное отсутствие гидрографической сети [25]. О состоянии загрязнения вод этого района имеется противоречивая информация: одни полагают, что воды восточного побережья в сравнении с западными акваториями менее загрязнены НП [23], а другие считают, что они традиционно сильно загрязнены НП [28]. Разброс концентраций НП здесь может составлять 0–0.36 мг/л (до 7.2 ПДК) при максимальных значениях до 1.71–2.37 мг/л (36–47 ПДК), зафиксированных в 1989 г. [28].

Восточная часть Северного Каспия находится под воздействием нефтяного загрязнения, вызванного ее утечками во время штормов, что приводит к сильному загрязнению вод НП этой части моря. Минимальная загрязненность вод НП отмечалась в районе Мангышлакского порога (на водоразделе между восточной и западной секциями Северного Каспия). В открытой части моря в восточных районах Северного Каспия в ноябре 1989 г. содержание НП составляло 0.07–0.74 мг/л (1–15 ПДК), а в придонном слое на центральном разрезе – 1.24 мг/л (25 ПДК) [49].

В сентябре 1990 г. в районе о. Огурчинский было установлено среднее содержание НП 3 ПДК, у п-ова Челекен – 3–4 ПДК. Несколько повышенным было содержание НП на восточном берегу разреза

о. Жилой–Куули Маяк (в среднем 6 ПДК). Аналогичные концентрации отмечены и в районе Бекдаша, причем в придонных водах содержание НП не превышало 1 ПДК. Восточная часть разреза Дербент–м. Песчаный характеризуется концентрацией НП 2–3 ПДК, а в районе м. Сагындык – 1–2 ПДК [23].

Исследования 1991–1992 гг. выявили концентрации НП 0.02–0.42 (среднее 0.149) мг/л в водах вдоль восточного берега Северного Каспия около Тенгизского месторождения нефти [49].

В районе Баутино в 1990 г. среднее содержание НП в воде составляло 2.2 ПДК, в 1991 г. оно снизилось до 0.8 ПДК (в мае отмечены повышенные концентрации – средние до 2, максимальные до 7 ПДК, а в августе и ноябре присутствия НП в воде обнаружено не было) [10]. В 1992–1993 гг. средние концентрации НП в воде здесь составляли 0.6 ПДК, а максимальные – до 2–7 ПДК [11] (табл. 1). В 1992–1993 гг. воды района Баутино классифицировались как грязные [10, 11].

В районе г. Шевченко в 1990 г. среднее содержание НП в воде составляло 3.2 ПДК, в 1991–1992 гг. оно снижалось до 0.04–0.2 ПДК [10], а в 1993 г. повышалось до 1 ПДК (при максимальных значениях 2.6 ПДК) (табл. 1) [11]. В эти годы воды в районе Шевченко классифицировались как загрязненные [10, 11].

**Южный Каспий.** Главные источники нефтяного загрязнения вод Южного Каспия – морские скважины (в период их бурения и эксплуатации), а также грязевые вулканы [25]. Во время разведочных бурений в районе месторождения “Нефтяные Камни” до 1958 г. в 27 скважинах было зафиксировано образование искусственных грифонов (выход нефти на поверхность моря). При этом некоторые грифоны действовали от нескольких дней до двух лет. Количество нефти, вытекающей из таких грифонов, составляло 100–150 т/сут [34, 38]. По данным космической радиолокации естественные выбросы нефти в юго-западной части Каспийского моря менялись от 1.7 до 16 тыс. т/год (или 4.7–43.8 т/сут) [18], а по другим данным – от 2.5 до 16.2 тыс. т/год (или 6.8–44.5 т/сут) [17].

В 1990 г. в водах Южного Каспия концентрации НП менялись в пределах 2–4 ПДК. В открытых районах моря состояние вод по химическим показателям в целом характеризовалось как переходное от загрязненного к грязному [41]. По результатам многочастотного радиолокационного зондирования морской поверхности, проведенного в 1989–1991 гг., суммарный вес свежеразлитой нефти на морской поверхности в районе “Нефтяных Камней” составлял ~32 тыс. т, а загрязненность района характери-

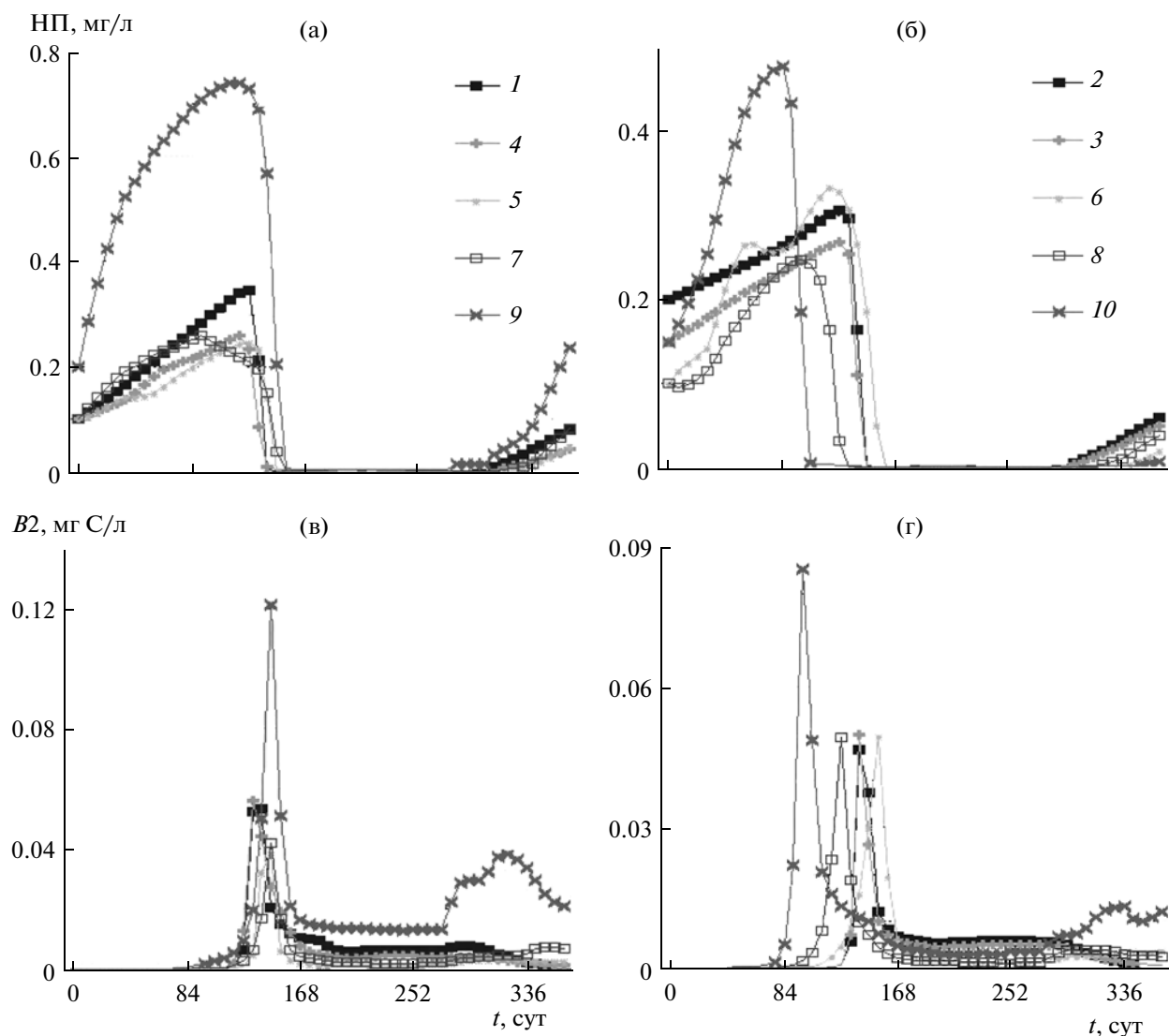


Рис. 1. Изменение в течение года расчетных концентраций НП и биомасс НП-окисляющих бактерий  $B_2$  в районах Каспийского моря. 1–10 – порядковый номер районов с севера на юг; а, в – западные, б, г – восточные районы моря.

зовалась средней концентрацией НП на поверхности  $\sim 62$  т/км<sup>2</sup> [4].

Так как Каспийское море – единый экологический комплекс, изменения которого на отдельных частях акватории неизбежно сказываются на всей экосистеме в целом, то необходимо принять меры по предотвращению загрязнения рек и моря НП, сточными водами промышленных предприятий и сельхозугодий [19]. В настоящее время для Каспийского моря становится актуальной необходимостью количественной оценки одновременного загрязнения морской среды НП и их деградации вследствие развития процессов ее самоочищения. Такое исследование может быть осуществлено, например, с помощью математического моделирования. Примеры подобных исследований на основе CNPSi-модели [29] имеются для зал. Анива (Охотское море) [30],

Каркинитского зал. (Черное море) [32] и Татарского прол. (Японское море) [31].

#### ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ПОСТУПЛЕНИЯ НП В АКВАТОРИИ МОРЯ

Имитационная CNPSi-модель ранее использовалась для исследования динамики соединений биогенных элементов и биомасс гетеротрофных бактерий, фито- и зоопланктона в десяти районах Каспийского моря (подразделение моря на районы показано на рис. 1 в [33]). Объемы вод районов 1–10 составляют соответственно 159.5, 120.3, 147.0, 114.1, 7012.0, 1892.0, 15412.0, 4624.0, 37764.0 и 6456.0 км<sup>3</sup>, а средние глубины – 6 м (районы 1–4) и 200, 100, 400, 100, 450 и 200 м (районы 5–10). Районы 1, 2, 4, 5, 7 и

**Таблица 2.** Принятые для расчетов концентрации НП, мг/л, в разные месяцы в водах основных притоков Каспийского моря

Река	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	За год
Волга	0.23	0.23	0.23	0.24	0.24	0.24	0.10	0.10	0.10	0.27	0.27	0.27	0.21
Урал	0.09	0.09	0.14	0.14	0.14	0.18	0.18	0.18	0.05	0.05	0.05	0.09	0.13
Терек	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Сулак	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15
Самур	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15
Кура	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.35

9 находятся под воздействием стока рек Волги, Урала, Терека, Сулака, Самура и Куры соответственно [33].

На основе проведенного выше анализа собранной информации оценим возможную роль отдельных источников в загрязнении акваторий моря НП. Прямое воздействие на содержание НП в морских водах оказывает речной сток, 90% которого поступает в Северный Каспий (в основном со стоком Волги).

Принятые для расчетов на модели концентрации НП в речных водах представлены в табл. 2. Следует отметить, что значения концентраций НП в речных водах косвенно учитывают влияние и ряда рассредоточенных источников – промышленных, муниципальных, сельскохозяйственных сточных вод, сбрасываемых непосредственно в речную сеть бассейна моря на участках прибрежной зоны.

В нагрузке по НП на морские экосистемы должны учитываться источники, действующие на их акваториях (такие, например, как судоходство, аварии, естественные выделения НП со дна в районах морских нефтегазовых месторождений, а также потери НП при их выходе на поверхность при разведке и промышленной разработке). Промышленные стоки приурочены, как правило, к району Апшеронского п-ова [25]. С учетом того, что Каспийское море – богатейшее природное месторождение углеводородного сырья с многочисленными участками и разной степенью освоенности нефтегазоносных структур [18], наиболее значимым источником загрязнения морской среды Каспия можно считать выделение НП со дна, которое зафиксировано во всех районах моря [25]. До недавнего времени авианаблюдения за загрязнением нефтью поверхностного слоя воды постоянно фиксировали наличие крупномасштабных полей дрейфующей нефти, покрывающей сотни и тысячи квадратных километров [38]. При скорости растекания нефти на поверхности моря 3–6 см/с ее пленка способна распространиться на расстояние 10–20 км за 3–5 сут [4].

Повышенное загрязнение вод Южного Каспия по НП связано с нефтедобычей и нефтеразведочным бурением, а также с активной вулканической деятельностью (грязевой вулканизм) в зоне нефте-

газоносных структур [25]. Преобладающее число пятен НП, формирующие на поверхности моря так называемые слики (или области ее выглаживания), сосредоточено именно в Южном Каспии над глубинами 500–700 м в 30–40 км к востоку от свала глубин. Полоса распространения пятен НП имеет ширину 50–60 км и вытянута в меридиональном направлении на 140 км, на севере и юге ее ширина уменьшается до 20 км. Плотность пятен существенно снижается в северном и восточном направлениях. Ряд пятен отмечен на мелководных участках, где глубины не превышают 100 м. Общее число наблюдаемых пятен – 423. В районах концентрирования пятен НП на поверхности моря на его дне отмечены выступающие формы подводного рельефа (в виде вулканов или грифонов). Выделение НП из них происходит в течение 6–10 ч (оценено на основе измерений расстояний между сликами) [17].

Выделяемые из вулканов (грифонов) НП с пузырьками газа всплывают на поверхность, пузырьки лопаются, а пленка НП остается на поверхности. Легкие фракции НП быстро испаряются, а водорастворимые – переходят в раствор. Остаточная пленка имеет повышенную вязкость, перемещается по поверхности течениями, меняет свою конфигурацию, а в открытом море вовлекается в циклонический круговорот вод. Средняя площадь сликов на акватории Южного Каспия варьирует от 0.6 до 3.4, общая за отдельные сутки – от 19.3 до 127.2, а за все дни наблюдений составляет 544.3 км<sup>2</sup> [16, 17].

Диапазон оценок по наблюдениям из космоса для естественных выделений НП со дна в Южном Каспии составляет, т/сут: 4.7–43.7 (среднее 24.2) [18] и 6.8–44.5 (25.7) [17], а по другим оценкам – 100–150 (125) [34]. Таким образом, среднее значение по наблюдениям из космоса составляет 25 [17, 18], а по другим оценкам – 125 т/сут [34].

Из результатов наблюдений следует, что слик длиной в несколько километров и шириной в сотни метров (общая площадь 1 км<sup>2</sup>, толщина пленки 10<sup>-3</sup>–10<sup>-4</sup> мм), существующий на поверхности ~1 сут и связанный с одним источником на дне, выделяет в воду до 400–500 кг НП/сут [17]. На основе этой информации и с учетом того, что таких сликов (пятен) НП в Южном Каспии было зафиксировано

423, получим скорость общего поступления НП в воду 169.2–211.5 (средняя 190.4) т/сут, а с учетом оцененной общей площади сликов ( $544.3 \text{ км}^2$ ) этот диапазон возрастает до 217.7–272.2 (245.0) т/сут. Эти расчеты показывают, что сделанные по космическим наблюдениям оценки весьма ориентировочны: даже в одной серии наблюдений, оперируя разными характеристиками, получаем существенный разброс значений интересующего параметра.

Рассчитаем среднее значение скорости естественного выделения НП со дна, оперируя результатами наблюдений из космоса по всем представленным выше оценкам

$$(25 + 190.4)/2 = 107.7; \quad (25 + 245)/2 = 135$$

$$\text{и } (107.7 + 135)/2 = 121.4 \text{ т/сут.}$$

Значение 121.4 т/сут фактически совпадает со средним 125 т/сут, полученным другими методами [34].

Следовательно, при расчете итоговых скоростей нагрузки по НП на морские акватории необходимо учесть значения оцененных поступлений НП из конкретных источников за единицу времени и на единицу объемов исследуемых морских вод, на которые эти источники воздействуют. В расчетах нагрузки по НП на морскую среду авторами принималось во внимание условное среднее значение оцененного поступления НП, близкое средним оценкам естественного выделения НП (125 т/сут). Это значение соотносилось с оцененной условной плотностью расположения выявленных и перспективных нефтегазоносных структур (карты их распределения) и с имеющимися данными о возможных потенциальных источниках загрязнения акваторий моря [16, 17], приходящимися на объемы воды в районах 1–10 Каспия [33].

Таким образом, условно плотность распределения нефтегазоносных структур и расположения в море источников загрязнения морской среды принималась за 100% для районов 1, 2, 3 и 10 (итоговая нагрузка 125 т/сут), за 80 – для районов 4, 9 (100), за 60 – для района 5 (75), за 40 – для районов 7 и 8 (50), за 20% – для района 6 (25 т/сут). С учетом объемов воды в районах 1–10 [33] получим соответствующие скорости поступления НП со дна моря в мелководных районах 1–4 –  $7.840 \times 10^{-4}$ ,  $1.039 \times 10^{-3}$ ,  $8.500 \times 10^{-4}$ ,  $8.760 \times 10^{-4}$  мг НП/(л сут) соответственно. В этих районах объемы воды в течение года приняты неизменными, поэтому приведенные выше расчетные скорости – средние для всего расчетного года. Для глубоководных районов 5–10 оцененные выше значения скоростей для всего столба воды соотносились с толщиной выделяемых верхнего и нижнего слоев, меняющихся по месяцам [33]. Итоговые расчетные скорости поступления НП в морскую среду для верхнего и нижнего слоев в районах 5–10 показаны в табл. 3.

Для наиболее загрязненного района 9 также при расчете нагрузки по НП на акваторию было учтено реальное поступление НП в поверхностный слой моря при нефтедобыче в районе “Нефтяных Камней”, порядок которого ~32 тыс. т [4]. Это значение соотносилось с толщиной верхнего слоя этого района. Полученные для разных месяцев значения нагрузки суммировались с оцененными скоростями выделения НП со дна в этом районе моря (табл. 3). Таким образом, итоговые значения нагрузки по НП для поверхностного слоя района 9 для каждого месяца года (с января до декабря) составили  $1.449 \times 10^{-2}$ ,  $1.449 \times 10^{-2}$ ,  $7.245 \times 10^{-3}$ ,  $5.795 \times 10^{-3}$ ,  $4.348 \times 10^{-3}$ ,  $2.896 \times 10^{-3}$ ,  $2.896 \times 10^{-3}$ ,  $2.896 \times 10^{-3}$ ,  $2.932 \times 10^{-3}$ ,  $8.694 \times 10^{-3}$ ,  $1.449 \times 10^{-2}$ ,  $1.449 \times 10^{-2}$  мг НП/(л сут) соответственно.

Заданные для расчетов на модели для разных районов моря значения начальных концентраций НП, соответствующих началу года, показаны в табл. 4. Уравнения модели решались методом Рунге–Кутты-4 с шагом по времени 0.1 сут. Расчеты проведены для периода 1 января–31 декабря по оцененным ранее среднесезонным показателям состояния морской среды (температура, освещенность, прозрачность), по значениям горизонтального (двустороннего) и вертикального водообмена, вычисленных с помощью гидродинамической модели [33].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНУТРИГODOVOЙ ДИНАМИКИ НП И БИОМАСС НП-ОКИСЛЯЮЩИХ БАКТЕРИЙ B2

Трансформация НП в морской среде отличается чрезвычайной сложностью, многофакторностью и разнообразием процессов, главные из которых – физический перенос, растворение и эмульгирование, окисление, деструкция, седиментация и биоседиментация, микробное разложение (биodeградация). Физический перенос действует на всех этапах присутствия НП в морской среде, а биodeградация завершает разложение растворенной (наиболее долгоживущей) фракции НП в морской среде [39]. В данной работе, как и в выполненных ранее исследованиях [30–32], учитывается только растворенная в воде фракция НП, ее трансформация происходит при деградации (потреблении) НП-окисляющими бактериями B2, а дополнительные потери определяются переносом (по горизонтали и вертикали) водных масс.

Следует отметить, что в водах Северного Каспия обнаружена значительная численность бактерий B2, что свидетельствует об интенсивном развитии процессов естественного самоочищения вод от нефти и ее производных, что в известной степени снижает негативное влияние загрязнения морской среды [26].

**Таблица 3.** Принятые для расчетов скорости поступления НП, мг/(л сут), из рассредоточенных источников для разных месяцев (здесь и в табл. 4 для глубоководных районов 5–10 Каспийского моря в числителе – данные для верхнего, в знаменателе – для нижнего слоев)

Район	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
5	$\frac{3.571 \times 10^{-4}}{1.103 \times 10^{-5}}$	$\frac{3.674 \times 10^{-4}}{1.114 \times 10^{-5}}$	$\frac{3.674 \times 10^{-4}}{1.114 \times 10^{-5}}$	$\frac{2.139 \times 10^{-4}}{1.126 \times 10^{-5}}$	$\frac{1.070 \times 10^{-4}}{1.188 \times 10^{-5}}$	$\frac{7.131 \times 10^{-5}}{1.258 \times 10^{-5}}$	$\frac{7.131 \times 10^{-5}}{1.258 \times 10^{-5}}$	$\frac{7.138 \times 10^{-4}}{1.258 \times 10^{-5}}$	$\frac{1.070 \times 10^{-4}}{1.188 \times 10^{-5}}$	$\frac{3.674 \times 10^{-4}}{1.114 \times 10^{-5}}$	$\frac{3.571 \times 10^{-4}}{1.103 \times 10^{-5}}$	$\frac{3.571 \times 10^{-4}}{1.103 \times 10^{-5}}$
6	$\frac{2.202 \times 10^{-4}}{1.406 \times 10^{-5}}$	$\frac{1.652 \times 10^{-4}}{1.436 \times 10^{-5}}$	$\frac{1.652 \times 10^{-4}}{1.436 \times 10^{-5}}$	$\frac{1.321 \times 10^{-4}}{1.468 \times 10^{-5}}$	$\frac{6.607 \times 10^{-5}}{1.652 \times 10^{-5}}$	$\frac{4.406 \times 10^{-5}}{1.888 \times 10^{-5}}$	$\frac{4.406 \times 10^{-5}}{1.888 \times 10^{-5}}$	$\frac{4.406 \times 10^{-4}}{1.888 \times 10^{-5}}$	$\frac{6.607 \times 10^{-4}}{1.652 \times 10^{-5}}$	$\frac{1.652 \times 10^{-4}}{1.436 \times 10^{-5}}$	$\frac{2.202 \times 10^{-4}}{1.406 \times 10^{-5}}$	$\frac{2.202 \times 10^{-4}}{1.406 \times 10^{-5}}$
7	$\frac{2.163 \times 10^{-4}}{3.294 \times 10^{-5}}$	$\frac{1.298 \times 10^{-4}}{3.327 \times 10^{-5}}$	$\frac{1.298 \times 10^{-4}}{3.327 \times 10^{-5}}$	$\frac{8.651 \times 10^{-5}}{3.371 \times 10^{-6}}$	$\frac{6.489 \times 10^{-5}}{3.415 \times 10^{-6}}$	$\frac{4.326 \times 10^{-5}}{3.507 \times 10^{-6}}$	$\frac{4.326 \times 10^{-5}}{3.507 \times 10^{-6}}$	$\frac{4.326 \times 10^{-5}}{3.507 \times 10^{-6}}$	$\frac{6.489 \times 10^{-5}}{3.415 \times 10^{-6}}$	$\frac{1.298 \times 10^{-4}}{3.327 \times 10^{-5}}$	$\frac{2.163 \times 10^{-4}}{3.294 \times 10^{-5}}$	$\frac{2.163 \times 10^{-4}}{3.294 \times 10^{-5}}$
8	$\frac{1.802 \times 10^{-4}}{1.150 \times 10^{-5}}$	$\frac{1.081 \times 10^{-4}}{1.201 \times 10^{-5}}$	$\frac{1.081 \times 10^{-4}}{1.201 \times 10^{-5}}$	$\frac{7.209 \times 10^{-5}}{1.272 \times 10^{-5}}$	$\frac{5.407 \times 10^{-5}}{1.352 \times 10^{-5}}$	$\frac{3.604 \times 10^{-5}}{1.545 \times 10^{-5}}$	$\frac{3.604 \times 10^{-5}}{1.545 \times 10^{-5}}$	$\frac{3.604 \times 10^{-5}}{1.545 \times 10^{-5}}$	$\frac{5.407 \times 10^{-5}}{1.352 \times 10^{-5}}$	$\frac{1.081 \times 10^{-4}}{1.201 \times 10^{-5}}$	$\frac{1.802 \times 10^{-4}}{1.150 \times 10^{-5}}$	$\frac{1.802 \times 10^{-4}}{1.150 \times 10^{-5}}$
9	$\frac{2.482 \times 10^{-4}}{3.355 \times 10^{-6}}$	$\frac{1.241 \times 10^{-4}}{3.401 \times 10^{-6}}$	$\frac{1.241 \times 10^{-4}}{3.401 \times 10^{-6}}$	$\frac{9.930 \times 10^{-5}}{3.424 \times 10^{-6}}$	$\frac{7.448 \times 10^{-5}}{3.464 \times 10^{-6}}$	$\frac{4.965 \times 10^{-5}}{3.547 \times 10^{-6}}$	$\frac{4.965 \times 10^{-5}}{3.547 \times 10^{-6}}$	$\frac{4.965 \times 10^{-5}}{3.547 \times 10^{-6}}$	$\frac{7.448 \times 10^{-5}}{3.464 \times 10^{-6}}$	$\frac{1.489 \times 10^{-4}}{3.385 \times 10^{-6}}$	$\frac{2.482 \times 10^{-4}}{3.355 \times 10^{-6}}$	$\frac{2.482 \times 10^{-4}}{3.355 \times 10^{-6}}$
10	$\frac{5.163 \times 10^{-4}}{1.597 \times 10^{-5}}$	$\frac{2.582 \times 10^{-4}}{1.648 \times 10^{-5}}$	$\frac{2.582 \times 10^{-4}}{1.648 \times 10^{-5}}$	$\frac{2.065 \times 10^{-4}}{1.675 \times 10^{-5}}$	$\frac{1.549 \times 10^{-4}}{1.721 \times 10^{-5}}$	$\frac{1.032 \times 10^{-4}}{1.822 \times 10^{-5}}$	$\frac{1.032 \times 10^{-4}}{1.822 \times 10^{-5}}$	$\frac{1.032 \times 10^{-4}}{1.822 \times 10^{-5}}$	$\frac{1.549 \times 10^{-4}}{1.721 \times 10^{-5}}$	$\frac{3.098 \times 10^{-4}}{1.630 \times 10^{-5}}$	$\frac{5.163 \times 10^{-4}}{1.597 \times 10^{-5}}$	$\frac{5.163 \times 10^{-4}}{1.597 \times 10^{-5}}$

**Таблица 4.** Принятые для расчетов начальные концентрации НП в районах 1–10 Каспийского моря

Западные акватории	НП, мг/л	Восточные акватории	НП, мг/л
1	0.10	2	0.20
4	0.10	3	0.15
5	$\frac{0.10}{0.15}$	6	$\frac{0.10}{0.15}$
7	$\frac{0.10}{0.15}$	8	$\frac{0.10}{0.15}$
9	$\frac{0.25}{0.25}$	10	$\frac{0.20}{0.25}$

Изменение в течение года расчетных концентраций НП и биомасс бактерий *B2* в районах 1–10 Каспийского моря показано на рис. 1. Согласно расчетам с начала года содержание НП в воде увеличивается, так как условия по температуре в целом неблагоприятны для развития в воде бактерий *B2*. Возрастание концентраций НП с начала года в западных районах моря отличается от такового в восточных районах. Так, в западных районах 1, 4, 5, 7 и 9 (с севера на юг) содержание НП возрастает и достигает максимума на 125-е сут (0.3491 мг/л), 119-е (0.2588), 125-е (0.2458), 91-е (0.2610) и 118-е сут (0.7414 мг/л) соответственно. Таким образом, в западных районах моря 1, 4, 5, 7 и 9 наибольшие концентрации НП зимой достигают 7.0, 5.2, 4.9, 5.2 и 14.8 ПДК соответственно. При этом возрастание концентраций НП в указанных районах происходит с начала года со скоростью  $2.00 \times 10^{-3}$  мг НП/(л сут),  $1.33 \times 10^{-3}$ ,  $1.17 \times 10^{-3}$ ,  $1.17 \times 10^{-3}$ ,  $1.77 \times 10^{-3}$  и  $5.95 \times 10^{-3}$  мг НП/(л сут). В восточных районах 2, 3, 6, 8 и 10 концентрации НП увеличиваются и достигают максимума на 128-е сут (0.3068 мг/л), 126-е (0.2685), 121-е (0.3341), 97-е (0.2476) и на 83-и сут (0.4777 мг/л) соответственно. Наибольшие значения концентраций НП зимой в восточных районах моря 2, 3, 6, 8 и 10 составляют 6.1, 5.4, 6.7, 5.0 и 9.6 ПДК соответственно. Скорость роста концентраций НП в указанных районах с начала года составляет  $8.38 \times 10^{-4}$  мг НП/(л сут),  $9.41 \times 10^{-4}$ ,  $1.94 \times 10^{-3}$ ,  $1.53 \times 10^{-3}$ ,  $1.77 \times 10^{-3}$  и  $3.97 \times 10^{-3}$  мг НП/(л сут) (рис. 1а, 1б).

Согласно модельным расчетам последующее за максимумами концентраций НП их снижение в водах разных районов связано с активизацией развития бактерий *B2*, которое в западных районах моря происходит практически синхронно. Это наглядно видно по изменениям в течение года значений удельной скорости роста *k* биомасс бактерий *B2* по акваториям моря (рис. 2). Динамика *k* – следствие изменчивости условий среды и обеспеченности бактерий *B2* субстратом питания (НП), а в целом служит показателем их окислительной активности.

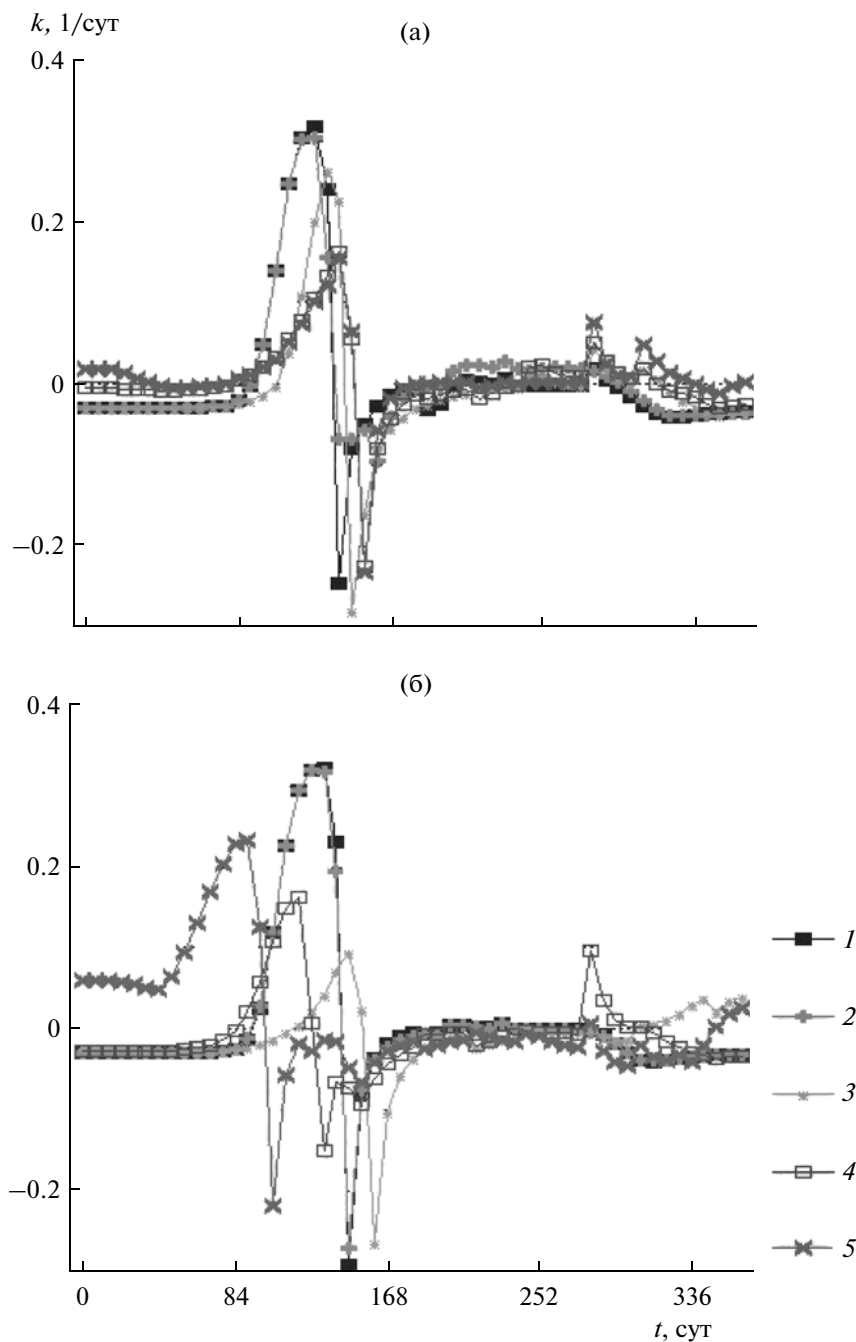
Значения *k*, меняющиеся в диапазонах 0–0.1, 0.1–0.2, 0.2–0.3 и >0.3 сут<sup>-1</sup>, свидетельствуют, соответственно, о низкой, средней, высокой и очень высокой окислительной активности бактерий [35]. Наибольшие значения *k* в западных районах 1, 4, 5, 7 и 9 составляют 0.319, 0.310, 0.269, 0.162 и 0.155 сут<sup>-1</sup> соответственно. В районах 1 и 4 наибольшие значения *k* приходятся на 125–124-е сут, а в районах 5, 7 и 9 – на 136–142-е сут. В восточных районах 2, 3, 6, 8 и 10 наибольшие значения *k* составляют 0.325, 0.324, 0.095, 0.165 и 0.236 сут<sup>-1</sup> соответственно, а приходятся они на разные сроки: на 131–129-е сут (районы 2 и 3), 147-е (6), 118-е (8) и 90-е сут (район 10) (рис. 1г). Таким образом, окислительная активность бактерий *B2* весной в северной, средней и южной частях Каспийского моря характеризуется как очень высокая, средняя и высокая соответственно.

Особенности развития биомасс *B2* по районам моря связаны с обеспеченностью и поступлением в водную среду субстратов питания (или НП). По времени весенние максимумы биомассы *B2* в западных районах 1, 4, 5, 7 и 9 отмечаются позже (на 13–58 сут) максимумов концентраций НП и приходятся соответственно на 138-е, 136-е, 145-е, 149-е и на 149-е сут. В восточных районах 2, 3, 6, 8 и 10 максимумы биомасс *B2* также сдвинуты по времени относительно максимумов концентраций НП и достигаются позже (на 15–29 сут) – соответственно на 143-и, 143-и, 154-е, 126-е и 101-е сут. Следует отметить, что в районе 6 максимумы биомассы *B2* и значений *k* формируются позднее, чем в расположенных севернее районах 2 и 3 (рис. 1в, 1г; 2б).

Наибольшее потребление НП бактериями *B2* в большинстве районов отмечено в мае и в районах 1–9 составляет соответственно 0.4331, 0.3333, 0.2929, 0.4354, 0.2561, 0.1869, 0.2165, 0.1759 и 0.7814 мг НП/(л мес). В районе 8 высокое потребление НП бактериями *B2* отмечено и в апреле (0.1039 мг НП/(л мес)), а в районе 10 в этом месяце оно наибольшее (0.5315 мг НП/(л мес)).

Таким образом, весной наименьшие (0.006–0.008 мг НП/(л сут)) скорости потребления НП бактериями *B2* получены для средней части (районы 5–8), повышенные (0.011–0.014) – северной части (районы 1, 2, 4) и наибольшие (0.017–0.025 мг НП/(л сут)) – для южной части моря (районы 9 и 10) (рис. 3).

Снижение в весенний период концентраций НП приводит к формированию в разных районах их остаточных концентраций летом–осенью. Среднее их содержание в западных районах 1, 4, 5, 7 и 9 составляет 2.8 мкг/л (для 147–301 сут), 2.1 (147–308), 0.5 (147–321), 0.8 (150–317) и 3.7 мкг/л (156–273 сут) соответственно. Для восточных районов 2, 3, 6, 8 и 10 подобные значения концентраций НП составляют 1.9 мкг/л (для 147–299 сут), 1.6 (146–301), 0.4 (160–343), 0.7 (130–322) и 1.4 мкг/л (107–350 сут). Таким



**Рис. 2.** Изменение удельных скоростей роста биомассы бактерий  $B_2$  в разных районах Каспийского моря. 1–5 — западные районы 1, 4, 5, 7 и 9 (а) и восточные районы 2, 3, 6, 8 и 10 (б).

образом, летом—осенью расчетные значения концентраций НП в поверхностном слое в районах 1–10 везде  $<$ ПДК (рис. 1а, 1б). Следует отметить, что для разных районов моря расчетные концентрации НП характеризуют равномерное их распределение во всем объеме вод. Они не воспроизводят возможных экстремально высоких концентраций НП, которые могут быть зафиксированы при выполнении

наблюдений в море, так как в естественных условиях в морской среде НП концентрируются в локальные скопления [35].

После весеннего максимума биомассы  $B_2$  в разных районах моря происходит ее снижение, и летом—осенью она держится на низком уровне, отвечающем не столько остаточным концентрациям НП в водной среде, сколько скоростям их поступле-

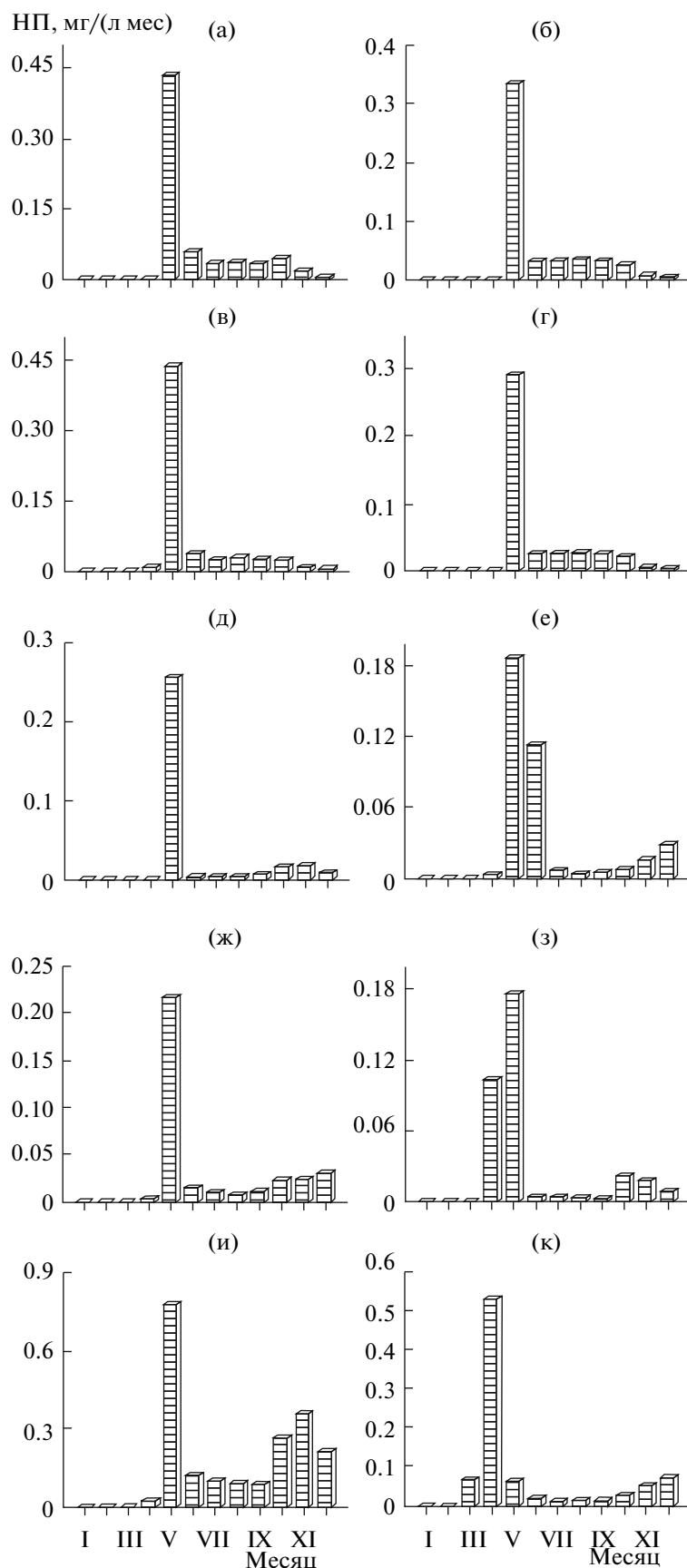


Рис. 3. Изменения расчетных ежемесячных значений потребления НП бактериями B2. а, в, д, ж, и – западные районы 1, 4, 5, 7, 9; б, г, е, з, к – восточные районы 2, 3, 6, 8, 10 соответственно.



ния в водную среду из разных источников. Проведен сопоставление для разных районов моря средних значений биомасс  $B_2$  и значений потребления ими НП летом—осенью: для западных районов 1, 4, 5, 7 и 9 средние минимальные значения биомасс  $B_2$  составляют 8.0, 5.6, 2.6, 3.8 и 14.5 мкг/л, а значения потребления ими НП — в среднем 0.0414, 0.0286, 0.0081, 0.0138 и 0.1013 мг НП/(л мес) соответственно; для восточных районов 2, 3, 6, 8 и 10 подобные оценки — 6.6 мкг/л (0.0309 мг НП/(л мес)), 5.8 (0.0250), 2.6 (0.0052), 3.1 (0.0073) и 7.4 мкг/л (0.0282 мг НП/(л мес)) соответственно (рис. 1в, 1г; 3).

Установившимся летом—осенью низким значениям биомасс бактерий  $B_2$  предшествуют формирующиеся после их весенних максимумов низкие отрицательные значения  $k$ , которые совпадают с начавшимся резким снижением биомасс  $B_2$  и свидетельствуют об отсутствии ее дальнейшего прироста. В западных районах 1, 4, 5, 7 и 9 эти периоды резких снижений значений  $k$  до  $-0.246$ ,  $-0.105$ ,  $-0.346$ ,  $-0.231$  и  $-0.237$  сут $^{-1}$  соответственно приходятся на 140–159-е сут, а в восточных районах их сроки совпадают только в северных районах 2 и 3 ( $-0.287\dots -0.292$  сут $^{-1}$  на 146–147-е сут). В районах 6, 8 и 10 сроки достижения минимумов значений  $k$  различны (до ~2 мес) и приходятся соответственно на 161-е ( $-0.265$ ), 131-е ( $-0.190$ ) и 104-е сут ( $-0.211$  сут $^{-1}$ ). Осенью и в конце года происходит повышение значений  $k$  до  $0.05$ – $0.1$  сут $^{-1}$  в районах 7–10 (рис. 2), однако заметное увеличение биомассы  $B_2$  в конце года имеет место только в районе 10 (рис. 1г).

Дополнительным критерием окислительной активности бактерий  $B_2$  служит потребление кислорода (ПК) ими на окисление соответствующих количеств НП. Оценки ПК на окисление НП у разных авторов отличаются и зависят от условий проведения экспериментов и типа исследуемых НП. Теоретически на полное окисление 1 мг НП (до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) расходуется 3–4 мг  $\text{O}_2$ , а меньшее его количество расходуется, когда некоторая доля С переходит в микробную биомассу [31]. Проведенные в данном исследовании расчеты показали, что в каспийской воде на окисление 1 мг НП расходуется в среднем 3.315 мг  $\text{O}_2$ . Таким образом, полученное значение соответствует теоретическому и близко к оценкам для других морских экосистем [31, 32].

К концу года происходит повышение концентраций НП, и только в западных районах моря достигаются такие их значения, которые были в поверхностном слое в начале года. В восточных районах повышение концентраций НП к концу года не столь значительно, как в западных (рис. 1а, 1б).

В целом сравнить полученные расчетные данные по разным месяцам (сезонам) с имеющимися по наблюдениям для разных районов Каспийского моря в настоящее время не представляется возможным. Дело в том, что имеющиеся во многих публикациях данные по содержанию НП в водах Каспия

подразделены по годам и районам, но не по месяцам (сезонам) проведения съемок. Хотя в течение года, как правило, проводилось несколько съемок концентраций НП в разных районах моря, в соответствующие публикации включались только две цифры — средние и максимальные концентрации НП, которыми характеризуются разные годы и районы моря (табл. 1).

Таким образом, все имеющиеся наблюдения на Каспийском море за многие годы выполнялись с целью получения только ориентировочных сведений о концентрациях ЗВ (включая НП) в морских водах, и на основе немногочисленных (часто разрозненных) данных оценивалась возможная межгодовая их изменчивость для предварительной характеристики степени загрязненности морской среды. Кроме как для такой предварительной оценки состояния морской среды на основе единичных разрозненных измерений, эти данные для дальнейших обобщений использовать нельзя. К сожалению, не было проявлено интереса за многие годы к изучению внутригодовой изменчивости показателей загрязнения морских вод. Поэтому современные перспективные исследования Каспийского моря существенно ограничиваются тем, что в литературе практически отсутствуют сведения о возможной внутригодовой динамике концентраций основных ЗВ в Каспийском море. Без этой информации достаточно трудно выявить даже тенденции, чтобы понять, как экосистема справляется с поступающими в море ЗВ. Ясно, что для получения более точной картины изменения в течение года концентраций НП для расчетов требуется соответствующая информация о внутригодовом распределении нагрузки из всех возможных источников. Нужны также специальные экспериментальные и натурные наблюдения за динамикой показателей загрязнения морских вод в отдельных (наиболее подверженных загрязнению) районах моря, чтобы найти соответствующие количественные показатели для характеристики развития химических и биологических процессов трансформации веществ в морской среде.

На данном этапе работ по результатам расчетов были оценены среднегодовые концентрации НП в разных районах моря. Для западных районов 1, 4, 5, 7 и 9 среднегодовые концентрации составляют 0.0856 мг НП/л (1.7 ПДК), 0.0726 (1.4), 0.0720 (1.4), 0.0862 (1.7) и 0.2579 мг НП/л (5.2 ПДК) соответственно. Для восточных районов 2, 3, 6, 8 и 10 получены следующие оценки — 0.1042 мг НП/л (2.1 ПДК), 0.0882 (1.6), 0.0100 (2.0), 0.0627 (1.3) и 0.0942 мг НП/л (1.9 ПДК). Таким образом, в средней части моря расчетные значения концентраций НП достаточно близки к средним наблюдаемым концентрациям НП (табл. 1), для других районов подобной сводки данных наблюдений нет и сравнить расчетные данные не с чем.

**Таблица 5.** Расчетные значения продукции бактерий В2 в верхнем слое в районах 1–10 Каспийского моря (в числителе — г С/(м<sup>3</sup> мес.) и г С/(м<sup>3</sup> год), в знаменателе — тыс. т С/мес. и тыс. т С/год)

Район	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	За год
Западные районы													
1	$\frac{4.77 \times 10^{-5}}{7.61 \times 10^{-3}}$	$\frac{1.80 \times 10^{-5}}{2.86 \times 10^{-3}}$	$\frac{9.91 \times 10^{-6}}{1.58 \times 10^{-3}}$	$\frac{3.81 \times 10^{-3}}{0.607}$	$\frac{0.8524}{135.952}$	$\frac{0.1314}{20.963}$	$\frac{0.0765}{12.201}$	$\frac{0.0789}{12.579}$	$\frac{0.0762}{12.151}$	$\frac{0.0954}{15.219}$	$\frac{0.0370}{5.905}$	$\frac{0.0101}{1.617}$	$\frac{1.3618}{217.207}$
4	$\frac{3.87 \times 10^{-5}}{4.41 \times 10^{-3}}$	$\frac{1.07 \times 10^{-5}}{1.22 \times 10^{-3}}$	$\frac{1.24 \times 10^{-5}}{1.41 \times 10^{-3}}$	$\frac{1.51 \times 10^{-2}}{1.720}$	$\frac{0.8534}{97.376}$	$\frac{0.0962}{10.977}$	$\frac{0.0512}{5.843}$	$\frac{0.0620}{7.073}$	$\frac{0.0596}{6.795}$	$\frac{0.0529}{6.039}$	$\frac{0.0202}{2.308}$	$\frac{9.24 \times 10^{-3}}{1.054}$	$\frac{1.2199}{139.192}$
5	$\frac{8.44 \times 10^{-6}}{1.78 \times 10^{-3}}$	$\frac{9.44 \times 10^{-6}}{1.99 \times 10^{-3}}$	$\frac{1.66 \times 10^{-5}}{4.64 \times 10^{-3}}$	$\frac{6.23 \times 10^{-4}}{0.219}$	$\frac{0.5011}{351.338}$	$\frac{0.0192}{20.210}$	$\frac{0.0096}{10.083}$	$\frac{0.0108}{11.403}$	$\frac{0.0151}{10.616}$	$\frac{0.0348}{9.766}$	$\frac{0.0382}{8.041}$	$\frac{0.0201}{4.231}$	$\frac{0.6496}{425.944}$
7	$\frac{2.87 \times 10^{-5}}{6.63 \times 10^{-3}}$	$\frac{4.90 \times 10^{-5}}{0.011}$	$\frac{1.43 \times 10^{-4}}{0.055}$	$\frac{5.74 \times 10^{-3}}{3.317}$	$\frac{0.4090}{315.168}$	$\frac{0.0645}{74.507}$	$\frac{0.0242}{27.953}$	$\frac{0.0185}{21.375}$	$\frac{0.0256}{19.699}$	$\frac{0.0496}{19.091}$	$\frac{0.0518}{11.976}$	$\frac{0.0692}{16.003}$	$\frac{0.7182}{509.162}$
9	$\frac{1.73 \times 10^{-4}}{0.087}$	$\frac{2.06 \times 10^{-4}}{0.104}$	$\frac{1.03 \times 10^{-3}}{1.038}$	$\frac{0.0428}{53.920}$	$\frac{1.4811}{2485.925}$	$\frac{0.3437}{865.259}$	$\frac{0.2033}{511.889}$	$\frac{0.1859}{468.052}$	$\frac{0.1827}{306.665}$	$\frac{0.5281}{443.194}$	$\frac{0.7344}{369.810}$	$\frac{0.4550}{229.112}$	$\frac{4.1586}{5735.054}$
Восточные районы													
2	$\frac{4.70 \times 10^{-5}}{5.66 \times 10^{-3}}$	$\frac{1.81 \times 10^{-5}}{2.17 \times 10^{-3}}$	$\frac{8.93 \times 10^{-6}}{1.08 \times 10^{-3}}$	$\frac{3.40 \times 10^{-4}}{0.041}$	$\frac{0.6503}{78.230}$	$\frac{0.0777}{9.342}$	$\frac{0.0664}{7.986}$	$\frac{0.0717}{8.629}$	$\frac{0.0682}{8.2100}$	$\frac{0.0562}{6.762}$	$\frac{0.0160}{1.920}$	$\frac{5.38 \times 10^{-3}}{0.647}$	$\frac{1.0123}{121.775}$
3	$\frac{4.69 \times 10^{-5}}{6.90 \times 10^{-3}}$	$\frac{1.78 \times 10^{-5}}{2.62 \times 10^{-3}}$	$\frac{8.80 \times 10^{-6}}{1.29 \times 10^{-3}}$	$\frac{3.93 \times 10^{-4}}{0.058}$	$\frac{0.5730}{84.223}$	$\frac{0.0610}{8.962}$	$\frac{0.0537}{7.898}$	$\frac{0.0588}{8.637}$	$\frac{0.0565}{8.309}$	$\frac{0.0466}{6.862}$	$\frac{0.0140}{2.064}$	$\frac{5.05 \times 10^{-3}}{0.743}$	$\frac{0.8692}{127.766}$
6	$\frac{1.25 \times 10^{-5}}{1.42 \times 10^{-3}}$	$\frac{2.25 \times 10^{-5}}{2.56 \times 10^{-3}}$	$\frac{6.35 \times 10^{-5}}{9.60 \times 10^{-3}}$	$\frac{3.85 \times 10^{-3}}{0.7282}$	$\frac{0.3372}{127.588}$	$\frac{0.2746}{155.839}$	$\frac{0.0183}{10.414}$	$\frac{0.0131}{7.460}$	$\frac{0.0143}{5.393}$	$\frac{0.0200}{3.021}$	$\frac{0.0362}{4.108}$	$\frac{0.0589}{6.744}$	$\frac{0.7765}{321.308}$
8	$\frac{7.21 \times 10^{-6}}{2.00 \times 10^{-3}}$	$\frac{2.15 \times 10^{-5}}{5.97 \times 10^{-3}}$	$\frac{4.37 \times 10^{-4}}{0.202}$	$\frac{0.1816}{125.992}$	$\frac{0.3762}{347.942}$	$\frac{0.0148}{20.547}$	$\frac{0.0134}{18.563}$	$\frac{0.0101}{13.957}$	$\frac{0.0093}{8.590}$	$\frac{0.0449}{20.748}$	$\frac{0.0386}{10.709}$	$\frac{0.0215}{5.967}$	$\frac{0.7109}{573.224}$
10	$\frac{3.90 \times 10^{-4}}{0.076}$	$\frac{9.58 \times 10^{-4}}{0.186}$	$\frac{0.1159}{46.082}$	$\frac{1.0757}{520.848}$	$\frac{0.1366}{88.1841}$	$\frac{0.0430}{41.593}$	$\frac{0.0289}{27.988}$	$\frac{0.0285}{27.635}$	$\frac{0.0289}{18.658}$	$\frac{0.0513}{16.565}$	$\frac{0.1048}{20.304}$	$\frac{0.1551}{30.033}$	$\frac{1.7700}{838.149}$

Взаимосвязи между химическими и биологическими переменными состояниями морской среды можно охарактеризовать значениями биопродукции (БП) микроорганизмов. Для бактерий  $B_2$  расчетные значения  $БП_{B_2}$  для поверхностного слоя представлены в табл. 5. В течение года в каждом районе имеется по два максимума  $БП_{B_2}$ : первый приходится на май (в районе 10 – на апрель), второй – на разные месяцы в зависимости от условий среды и поступления в районы моря НП (в районах 1 и 4 – на октябрь, в районах 2 и 3 – на август–сентябрь, а в районах 5–10 – на октябрь–декабрь). Значения весенних максимумов  $БП_{B_2}$  в западных районах 1, 4, 5, 7 и 9 составляют 0.8524, 0.8534, 0.5011, 0.4090 и 1.4811 г С/(м<sup>3</sup> мес), а в восточных 2, 3, 6, 8 и 10 – 0.6503, 0.5730, 0.3372, 0.3762 и 1.0757 г С/(м<sup>3</sup> мес) соответственно. Таким образом, значения  $БП_{B_2}$  для весны выше в западных районах моря, чем в восточных. Важно и то, что значения  $БП_{B_2}$  в средней части моря (районы 5–8) ниже, чем в северных (районы 1–4) и южных (районы 9–10) его частях.

Между повышенными значениями  $БП_{B_2}$  в западных и восточных районах во вторую половину года больших отличий нет; исключение имеется лишь для южных районов: в районе 9 наблюдаемое в ноябре повышенное значение  $БП_{B_2}$  (0.7344 г С/(м<sup>3</sup> мес)) в среднем на порядок выше, чем таковое в районе 10 в ноябре–декабре (0.0513–0.1048 г С/(м<sup>3</sup> мес)).

На пересчет приведенных выше значений  $БП_{B_2}$  в размерность тыс. т С/мес. для поверхностного слоя глубоководных районов 5–10 влияют общие объемы вод в этих районах, а также условия их перемешивания, определяемые толщиной верхнего слоя, меняющейся в разные месяцы. Так как объемы вод в районах моря возрастают в направлении с севера на юг, такие же тенденции обнаруживаются при анализе расчетных значений  $БП_{B_2}$ , тыс. т С/мес., для весеннего периода. В целом значения  $БП_{B_2}$  в тыс. т С/мес. выше в западных районах в сравнении с восточными. Отличия между повышенными значениями  $БП_{B_2}$  в западных и восточных районах моря во вторую половину года менее выражены, за исключением южной части моря – здесь в районе 9 расчетное значение  $БП_{B_2}$  для ноября (369.810 тыс. т С/мес.) в среднем в 15 раз выше, чем в районе 10 в ноябре–декабре (20.304–30.033 тыс. т С/мес.) (табл. 5).

Следует отметить, что изменения годовых значений  $БП_{B_2}$  по районам моря в целом повторяют тенденции, выявленные при изменении наибольших значений  $БП_{B_2}$  в период весеннего их развития.

Результаты модельных расчетов показывают, что распределение рассмотренных в данном исследовании характеристик – концентраций НП, биомасс бактерий  $B_2$ , удельной скорости их роста  $k$ , показателей окислительной активности  $B_2$  (значений НП и ПК, потребляемых  $B_2$ ) и  $БП_{B_2}$ , также как и выявленное ранее распределение биогенных веществ

[33], неоднородно по пространству и, очевидно, зависит от особенностей поступления НП в экосистему моря (в частности, от временной характеристики этого процесса). Представляется крайне желательным специально рассмотреть оцененные по результатам моделирования внутренние и внешние потоки НП и составить по результатам расчетов ориентировочный их баланс по районам моря и для всего водоема.

#### АНАЛИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ БАЛАНСА НП ДЛЯ РАЙОНОВ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Предполагается, что основная масса ЗВ (включая и НП) поступает в западные акватории моря (с речными водами и с городскими стоками), а прибрежными течениями они переносятся на юг в направлении доминирующего переноса вод. Активный водообмен (особенно зимой) между Средним и Южным Каспием происходит до траверза Кара-Богаз-Гола. Восточные акватории моря загрязняются в меньшей степени (здесь практически отсутствует речная сеть, на берегу нет крупных населенных пунктов). Однако крупномасштабная циркуляция вод в Каспийском море способствует достаточно однородному перераспределению ЗВ по его акватории [25].

По результатам моделирования были проведены расчеты составляющих годовых балансов НП для районов 1–10 моря (верхний слой) с учетом основных процессов, определяющих поступления НП в водную среду и их последующую трансформацию (табл. 6). Анализ расчетных данных показал, что при раздельном рассмотрении районов моря выявляются существенные пространственные отличия в выраженности отдельных источников (процессов), что приводит к существенным невязкам при оценке баланса НП. Например, влияние на нагрузку по НП суммарно речного стока и других рассредоточенных источников (промышленных, муниципальных, сельскохозяйственных сточных вод) важно только для района 1 (42.4%); роль загрязнения морской среды в самом море – существенна для районов 9 (99.9), 2 и 3 (85.1–81.9), и она менее значима для районов 5–8 (2.3–16.0); роль переноса НП из соседних районов важна для района 6 (91.9), 4 (57.5), 5 (50.9) и 10 (37.3), а вертикального переноса – для районов 7 (69.4), 8 и 10 (53.5–54.9%).

Потери НП преимущественно определяются их разложением/потреблением бактериями  $B_2$ , наиболее значимыми в районах 1 и 10 (92.8–96.5%), 2 и 3 (84.2–88.3), 5 и 9 (80.5–78.5), 4 и 8 (70.9–75.3), и менее значимыми в районах 6 и 7 (48.2–56.2%). Потери НП определяются также выносом их течениями в соседние районы, который существенен для районов 7 (43.8%), 8 и 4 (24.5–29.1), и менее значим для районов 9, 2 и 5 (15.6–19.5), а также 3 и 6 (11.7–13.3%). В районе 6 существенны также потери НП

**Таблица 6.** Расчетный баланс НП, тыс. т НП/год, для отдельных районов Каспийского моря (моделирование, верхний слой; здесь и в табл. 7 в скобках – в процентах суммы  $\Sigma$  потоков; прочерк – в северной части моря поток не учитывается, в средней и южной – учитывается итоговый поток либо в приходной, либо в расходной частях баланса)

Составляющие баланса НП	Акватория моря				
	северная		средняя		южная
	Западные районы				
	1	4	5	7	9
Приход					
с речным стоком*	46.657 (42.4)	1.737 (1.9)	0.452 (0.3)	0.092 (<0.1)	3.612 (0.1)
загрязнение в море	45.654 (41.5)	36.492 (40.6)	27.399 (16.0)	18.258 (2.3)	2592.011 (99.9)
перенос из соседних районов	17.735 (16.1)	51.588 (57.5)	87.365 (50.9)	229.668 (28.3)	0.025 (<0.1)
вертикальный перенос	–	–	56.395 (32.8)	561.951 (69.4)	–
$\Sigma$ потоков	110.046 (100.0)	89.817 (100.0)	171.611 (100.0)	809.969 (100.0)	2595.648 (100.0)
Потери					
потребление бактериями <i>B2</i>	105.725 (92.8)	68.505 (70.9)	203.564 (80.5)	238.751 (56.2)	2801.666 (78.5)
вынос в соседние районы	8.197 (7.2)	28.188 (29.1)	49.180 (19.5)	186.280 (43.8)	554.915 (15.6)
вертикальный перенос	–	–	–	–	211.573 (5.9)
$\Sigma$ потоков	113.922 (100.0)	96.693 (100.0)	252.744 (100.0)	425.031 (100.0)	3568.154 (100.0)
Баланс/невязка, %	–3.9/3.5	–6.9/7.4	–81.1/39.7	384.9/47.5	–972.6/32.4
Модуль нагрузки, тыс. т НП/ $V$ , км <sup>3</sup>	0.690	0.787	0.326	1.335	1.943
	Восточные районы				
	2	3	6	8	10
Приход					
с речным стоком*	0.868 (1.6)	–	–	–	–
загрязнение в море	45.630 (85.1)	45.618 (81.9)	9.148 (8.1)	18.254 (5.2)	36.513 (7.8)
перенос из соседних районов	7.148 (13.3)	10.052 (18.1)	104.200 (91.9)	143.811 (41.3)	174.948 (37.3)
вертикальный перенос	–	–	–	186.558 (53.5)	257.833 (54.9)
$\Sigma$ потоков	53.646 (100.0)	55.670 (100.0)	113.348 (100.0)	348.623 (100.0)	469.294 (100.0)
Потери					
потребление бактериями <i>B2</i>	59.800 (84.2)	62.637 (88.3)	149.273 (48.2)	271.599 (75.3)	406.629 (96.5)
вынос в соседние районы	11.204 (15.8)	8.298 (11.7)	41.055 (13.3)	88.137 (24.5)	14.810 (3.5)
вынос из моря	–	–	–	0.645 (0.2)	–
вертикальный перенос	–	–	119.365 (38.5)	–	–
$\Sigma$ потоков	71.004 (100.0)	70.935 (100.0)	309.693 (100.0)	360.381 (100.0)	421.439 (100)
Баланс/невязка, %	–17.4/28.4	–15.3/24.6	–196.3/118.3	–11.8/3.4	47.9/10.8
Модуль нагрузки, тыс. т НП/ $V$ , км <sup>3</sup>	0.446	0.379	0.399	0.479	0.913

\* – здесь и в табл. 7 этот поток учитывает суммарное поступление в море НП с речными водами и из рассредоточенных источников (с промышленными, муниципальными, сельскохозяйственными сточными водами, сбрасываемыми непосредственно в речную сеть бассейна моря на участках прибрежной зоны).

за счет процессов вертикального обмена (38.5%) (табл. 6).

Разная выраженность указанных процессов приводит к тому, что при рассмотрении районов моря по отдельности получают большие различия между районами в количественной сбалансированности потоков НП в поверхностном слое – между их

поступлениями и последующей деградацией. Особенно высок дисбаланс указанных потоков в районах 6, 7, 5 и 9, невязка баланса в которых составляет 118.3, 47.5, 39.7 и 32.4% соответственно. Получена высокая сбалансированность процессов поступления и трансформации НП только в районах 1 и 8 (3.4–3.5%), и несколько ниже она в районах 4 и 10 (7.4–10.8%) (табл. 6).

**Таблица 7.** Расчетный баланс НП, тыс. т НП/год, для укрупненных районов и в целом для Каспийского моря (моделирование, верхний слой)

Составляющие баланса НП	Акватория моря					Все море
	северная	средняя	южная	западная	восточная	
Приход						
с речным стоком*	49.262 (15.9)	0.544 (<0.1)	3.612 (0.1)	52.550 (1.4)	0.868 (0.1)	53.418 (1.3)
загрязнение в море	173.394 (56.1)	73.603 (5.1)	2632.136 (85.8)	2719.814 (72.0)	155.163 (14.9)	2874.977 (72.0)
перенос из соседних районов	86.523 (28.0)	565.044 (39.2)	174.973 (5.7)	386.381 (10.2)	440.159 (42.3)	—
вертикальный перенос	—	804.904 (55.7)	257.833 (8.4)	618.346 (16.4)	444.391 (42.7)	1062.737 (26.7)
Σ потоков	309.179 (100.0)	1444.095 (100.0)	3068.554 (100.0)	3777.091 (100.0)	1040.581 (100.0)	3991.132 (100.0)
Потери						
потребление бактериями B2	296.667 (84.2)	863.187 (64.0)	3208.295 (80.4)	3418.211 (76.7)	949.938 (77.0)	4368.149 (93.0)
вынос в соседние районы	55.887 (15.8)	364.652 (27.1)	569.725 (14.3)	826.760 (18.6)	163.504 (13.2)	—
вынос из моря	—	0.645 (<0.1)	—	—	0.645 (0.1)	0.645 (<0.1)
вертикальный перенос	—	119.365 (8.9)	211.573 (5.3)	211.573 (4.7)	119.365 (9.7)	330.938 (7.0)
Σ потоков	352.554 (100.0)	1347.849 (100.0)	3989.593 (100.0)	4456.544 (100.0)	1233.452 (100.0)	4699.732 (100.0)
Баланс/невязка, %	43.4/13.2	96.3/6.9	−921.0/26.6	−679.4/16.6	192.9/17.1	708.6/16.4
Модуль нагрузки, тыс. т НП/V, км <sup>3</sup>	0.572	0.673	1.659	1.378	0.580	0.880

Анализ потоков НП для районов Каспийского моря показал важную значимость пространственного фактора в выраженности отдельных процессов. Поэтому была сделана попытка составить балансы НП по иному региональному принципу — отдельно для укрупненных акваторий моря с объединением районов в северной, средней и южной частях моря, а также в его западной и восточной половинах (табл. 7).

Такая региональная компоновка полученных расчетных данных позволяет существенно снизить дисбаланс между оцениваемыми потоками НП — их поступлением и трансформацией в водной среде. Суммарное поступление НП в Каспий возрастает от 309.18 (северная часть) до 1444.10 (средняя часть) и до 3068.55 тыс. т НП/год (южная часть моря). В северной части моря нагрузка по НП распределена между загрязнением морской среды (56.1%), переносом из соседних акваторий (28.0%) и речным стоком (15.9%). В средней части моря она определяется вертикальным обменом (55.7%) и переносом из соседних районов (39.1%), а в южной части — в основном загрязнением в море (85.8%). Потери НП в северной и южной частях моря обеспечиваются в основном процессами разложения/потребления НП бактериями B2 (80.4—84.2%) и выноса течениями (14.3—15.8%). В средней части роль бактерий в трансформации НП снижается до 64.0%, их вынос

течениями увеличивается до 27.1% и становится ощутимым вклад вертикального обмена (8.9%). При таком подходе к составлению баланса НП сбалансированность рассмотренных процессов в средней части моря, оцениваемая по невязке баланса НП, составляет 6.9%, а для северной и южной частей моря она несколько ниже при невязке баланса НП 13.2 и 26.6% соответственно (табл. 7).

Более наглядное представление о сбалансированности процессов получено на основе соответствующей компоновки расчетных данных при подразделении моря на западную и восточную акватории. Поступление НП в западную акваторию моря составляет 3777.09 тыс. т НП/год (причем на 72.0% оно обеспечивается загрязнением в море, на 16.4% — процессами вертикального обмена и на 10.2% — переносом из соседних районов). В восточную акваторию моря поступает 1040.58 тыс. т НП/год, и это количество на 42.7% обеспечивается вертикальным обменом, на 42.3% — переносом из соседних районов и на 14.9% — процессами загрязнения морской среды. Потери НП в западной и восточной акваториях моря на 76.7—77.0% связаны с активностью бактерий B2, на 13.6—18.2% — выносом течениями в соседние районы и на 4.7—9.7% — с вертикальным обменом. Невязки баланса НП для этих акваторий моря близки и составляют 16.6—17.1% (табл. 7).

Объединение информации для западной и восточной акваторий моря позволяет составить баланс по НП для всего моря в целом. При этом следует исключить из рассмотрения составляющие баланса по переносу (выносу) НП течениями между соседними акваториями моря. Таким образом, получаем, что за год в море поступает 3991.13 тыс. т НП (72.0% — за счет источников загрязнения в море и 26.7% — процессов вертикального обмена), а потери НП составляют 4699.73 тыс. т НП/год (на 93.0% они связаны с процессами потребления НП бактериями B2 и на 7% — с вертикальным обменом). Таким образом, полученная невязка между приходной и расходной составляющими баланса НП для всего моря составляет вполне приемлемую величину — 16.4% (табл. 7). Такая невязка баланса вполне допустима, так как она соответствует неопределенности исходной информации и точности метода оценки нагрузки по НП на экосистему моря. Также следует принять во внимание, что в данном случае при расчетах рассматривалась лишь одна, растворенная в воде, фракция НП, способная образовывать на поверхности моря нефтяные пленки, и не учитывалась ее потенциальное поступление в воду при трансформации других фракций НП. Известно, что количество образующейся нефтяной эмульсии (пленки) по объему через некоторое время может превысить в 2–3 раза объем свежей порции НП, попавшей в море. В зависимости от плотности исходной НП время жизни их пятен составляет от суток до нескольких месяцев, а легкой НП — от суток до нескольких суток [15].

Полученная информация по балансу НП, однако, дает основание для оценки сути проблемы НП загрязнения Каспийского моря. Прежде следует отметить, что авторам не известны работы, в которых приводится баланс по НП для отдельных районов и Каспийского моря в целом, по крайней мере, по двум причинам. Главное — отсутствие у специалистов апробированного алгоритма (или модели) для расчетов, учитывающего весь набор факторов, влияющих на изменение концентраций НП в морской среде. Вторая причина — разрозненность имеющихся данных и неопределенность информации, по которым следует оценивать нагрузку по НП на экосистему водоема. Они вместе ставят под сомнение саму возможность корректного расчета такого баланса для отдельных районов и моря в целом. В данном исследовании для расчетов и оценки баланса веществ с учетом важнейших факторов среды использовалась CNPSi-модель [29] — инструмент для водно-экологических исследований. Также впервые для составления баланса НП использованы имеющиеся данные не только о поступлении в море НП из внешних, но и таких источников, которые расположены в самом море и которые обеспечивают поступление значительных количеств НП в морскую среду. Влияние таких источников на загрязнение моря оценивается на основе современных наблюдений со спутни-

ков, эти источники подразделяются на естественные (грифоны и подводные вулканы, выделения из которых формируют пленки НП на поверхности моря) и промышленные (производственные комплексы по добыче НП в море, в частности, в наиболее загрязненном районе 9 — “Нефтяные камни”). Разовое поступление НП в морскую среду из последнего, оцененное в ~32 тыс. т [4], сопоставимо с годовым выносом в море НП со стоком Волги — 35 тыс. т [28]. Если допустить, что таких выбросов в течение года может быть несколько, то полученная в данном исследовании невязка в 16.4% будет легко компенсирована.

Значимость загрязнения морской среды НП при составлении балансов НП оценивалась по вычисленному для каждого района модулю нагрузки — соотношению суммарных количеств поступающих за год НП в поверхностный слой в данный район и общего объема его вод (для глубоководных районов рассчитывался среднегодовой объем поверхностного слоя с учетом его изменения в отдельные месяцы). Расчеты показывают, что в северной части моря модуль нагрузки повышен в западных районах 1 и 4 (соответственно 0.690 и 0.787 тыс. т НП/км<sup>3</sup>), загрязнение которых наиболее опасно своими последствиями из-за высокой биопродуктивности указанных районов. Пониженные значения модуля нагрузки характеризуют районы 2, 3, 5, 6 и 8 (0.326–0.479 тыс. т НП/км<sup>3</sup>), а наиболее высокие они — в районах 7, 9 и 10 (0.913–1.943 тыс. т НП/км<sup>3</sup>), отличающиеся высокими суммарными поступлениями НП (табл. 6).

Укрупнение районов при составлении баланса НП позволяет видеть, что модуль нагрузки по НП на морскую среду возрастает (в 2.9 раза) с севера на юг (составляет 0.572, 0.673 и 1.659 тыс. т НП/км<sup>3</sup> соответственно в северной, средней и южной частях моря) и снижается (в 2.4 раза) с запада на восток (1.378 и 0.580 тыс. т НП/км<sup>3</sup> соответственно в западной и восточной частях моря). Такая компоновка районов показывает формальное распределение роли источников нагрузки по акваториям моря и соотношение количеств поступающих за год НП на единицу объемов вод верхнего слоя (табл. 7).

В целом для всего моря модуль нагрузки по НП на экосистему составляет 0.88 тыс. т НП/км<sup>3</sup>, который нивелирует все особенности пространственного распределения источников нагрузки, их значимость и последствия для отдельных районов моря. Теоретически можно контролировать только один внешний источник — речной сток (вместе с промышленными, муниципальными и сельскохозяйственными стоками), чтобы снизить его роль в нагрузке по НП на водоем. Оказывается, что по отношению ко всему водоему количественно роль этого источника в нагрузке по НП составляет всего 1.3%, а основное количество НП (72%) поступает в морскую среду в самом море из неконтролируемых

естественных (грифоны и подводные вулканы) и промышленных (сбросы из крупных промышленных комплексов) источников (табл. 7).

## ВЫВОДЫ

На основе обобщения данных из литературы, в которых приведены сведения о содержании НП в водах притоков и отдельных районов моря, а также представлены результаты современных наблюдений за состоянием поверхности моря и наличием на ней пленок НП, были оценены показатели нагрузки по НП для десяти районов Каспийского моря.

Расчеты на CNPSi-модели внутригодовых изменений концентраций НП и биомасс НП-окисляющих бактерий *B2* выполнялись с учетом изменений морфометрических характеристик районов по среднесезонным данным об изменениях в течение года параметров морской среды (температура, освещенность, прозрачность) и показателей водообмена по горизонтали между выделенными районами и между слоями на глубоководных участках в средней и южной частях моря.

Расчеты показали, что с начала года содержание НП на разных участках моря увеличивается: в западных районах 1, 4, 5, 7 и 9 в среднем со скоростью  $2.00 \times 10^{-3}$  мг НП/(л сут),  $1.33 \times 10^{-3}$ ,  $1.17 \times 10^{-3}$ ,  $1.17 \times 10^{-3}$ ,  $1.77 \times 10^{-3}$  и  $5.95 \times 10^{-3}$  мг НП/(л сут); зимой в этих районах оно достигает максимума на 125-е сут (7.0 ПДК), 119-е (5.2), 125-е (4.9), 91-е (5.2) и на 118-е сут (14.8 ПДК) соответственно. В восточных районах 2, 3, 6, 8 и 10 концентрации НП увеличиваются и достигают зимой максимума на 128-е сут (6.1 ПДК), 126-е (5.4), 121-е (6.7), 97-е (5.0) и на 83-и сут (9.6 ПДК) при средних скоростях возрастания концентраций НП в указанных районах с начала года  $8.38 \times 10^{-4}$  мг НП/(л сут),  $9.41 \times 10^{-4}$ ,  $1.94 \times 10^{-3}$ ,  $1.53 \times 10^{-3}$ ,  $1.77 \times 10^{-3}$  и  $3.97 \times 10^{-3}$  мг НП/(л сут) соответственно.

Последующее снижение концентраций НП в водах Каспийского моря связано с активизацией развития биомассы бактерий *B2*: их окислительная активность, оцененная по значениям удельной скорости роста биомассы *B2*, характеризуется следующими грациями: в северных районах моря — очень высокая ( $k = 0.310-0.325$  сут<sup>-1</sup>), в южных районах — высокая ( $k = \sim 0.2$  сут<sup>-1</sup>), в средней части — средняя ( $k = 0.1-0.2$  сут<sup>-1</sup>).

При весеннем активном развитии биомасс *B2* скорости потребления НП составляли: 0.006–0.008 (средняя часть моря, районы 5–8), 0.011–0.014 (северная часть моря, районы 1, 2 и 4) и 0.017–0.025 мг НП/(л сут) (южная часть моря, районы 9 и 10). Значения биопродукции *B2*,  $B_{P_{B2}}$  для весеннего периода выше в западных районах 1, 4, 5, 7 и 9 (соответственно 0.8524, 0.8534, 0.5011, 0.4090 и 1.4811 г С/(м<sup>3</sup> мес.)), в восточных 2, 3, 6,

8 и 10 они составляют 0.6503, 0.5730, 0.3372, 0.3762 и 1.0757 г С/(м<sup>3</sup> мес.) соответственно.

Летом—осенью расчетные концентрации НП во всех районах моря меньше ПДК, а среднегодовые их значения для районов 1–10 составляют 1.7, 2.1, 1.6, 1.4, 1.4, 2.0, 1.4, 1.3, 5.2 и 1.9 ПДК соответственно. Среднегодовые концентрации НП в средней части моря, оцененные по многолетним натурным наблюдениям, свидетельствуют об их близости расчетным среднегодовым концентрациями НП. Однако среднегодовые концентрации НП в водах Каспия не информативны, их нельзя использовать для оценки потенциала морской экосистемы к самоочищению. Необходимо интенсифицировать наблюдения в летние месяцы, когда экосистема особенно активно перерабатывает имеющиеся в морской среде ЗВ. Очевидно, что необходима организация международного мониторинга для наблюдений за состоянием экосистемы Каспия по единой программе. По данным об изменениях концентраций НП в разные месяцы можно корректно оценивать потенциал морской среды к ее самоочищению от НП, поступающих в море из разных источников.

Для районов 1–10 были составлены годовые балансы НП для поверхностного слоя с учетом оцененных внешних и внутренних их потоков в экосистеме моря. При рассмотрении балансов НП отдельно для каждого района выявлены существенные отличия в выраженности их составляющих. В районе 1 нагрузка по НП определяется речным стоком (вместе с рассредоточенными источниками — промышленными, муниципальными и сельскохозяйственными сбросами сточных вод) (42.4%) и загрязнением в море — выделением со дна (41.5%), загрязнение в самом море особенно значимо в районе 9 (99.9%), 2 и 3 (85.1–81.9%) и второстепенно — в районах 5–8 (2.3–16.0%), горизонтальный перенос из соседних акваторий важен в районах 6, 4, 5 и 10 (соответственно 91.9, 57.5, 50.9 и 37.3%), а вертикальный перенос — в районах 7, 10 и 8 (соответственно 69.4, 54.9 и 53.5%).

Неравнозначно по районам моря распределяются и годовые потери НП. Разложение бактериями *B2* наиболее существенно в районах 1 и 10 (92.8–96.5%), 2 и 3 (84.2–88.3), 5 и 9 (80.5–78.5), 4 и 8 (70.9–75.3), а менее значимо — в районах 6 и 7 (48.2–56.2%). Вынос водными массами в соседние районы существенен для районов 7 (43.8%), 8 и 4 (24.5–29.1%), и менее значим для районов 9, 2 и 5 (15.6–19.5%) и также 3 и 6 (11.7–13.3%). Для района 6 существенны также потери за счет вертикального обмена (38.5%).

При рассмотрении балансов НП для каждого из районов 1–10 отдельно не выявлено сбалансированности между годовыми потоками НП, определяющими их поступление и потери. Для районов 5, 6, 7 и 9 дисбаланс указанных потоков особенно высок и невязка баланса НП в них составляет 39.7,

118.3, 47.5 и 32.4% соответственно. Высокая сбалансированность составляющих баланса НП фиксируется в районах 1 и 8 (3.4–3.5%), и несколько ниже она в районах 4 и 10 (7.4–10.8%).

Составление баланса НП для укрупненных акваторий (с объединением районов в северной, средней и южной частях, а также в западной и восточной половинах моря) позволило снизить дисбаланс между составляющими, по которым оценивается баланс НП. В северную, среднюю и южную части моря за год поступает соответственно 309.18, 1444.10 и 3068.55 тыс. т НП. В северной части моря нагрузка по НП определяется загрязнением в море (56.1%), переносом из соседних акваторий (28.0%) и речным стоком (вместе с рассредоточенными источниками) (15.9%); в средней она формируется вертикальным обменом (55.7%) и горизонтальным переносом (39.1%), а в южной – в основном, загрязнением в море (85.8%). Потери НП в северной и южной частях определяются разложением (потреблением) бактериями *B2* (80.4–84.2%) и горизонтальным выносом течениями (14.3–15.8%), а в средней части роль указанных источников количественно меняется: биотрансформация НП снижается до 64.0%, горизонтальный перенос возрастает до 27.1%, становится ощутимым обмен по вертикали (8.9%). Сбалансированность составляющих баланса НП, оцениваемая по его невязке, в средней части моря составляет 6.9%, а в северной и южной – 13.2 и 26.6% соответственно.

В западную половину моря поступает за год 3777.09 тыс. т НП (72.0% приходится на загрязнение в море, 16.4 – на вертикальный обмен, 10.2% – на горизонтальный перенос), а в восточную – 1040.58 тыс. т НП (42.7% определяется обменом по вертикали, 42.3 – горизонтальным переносом, 14.9% – загрязнением в море). Потери НП в указанных акваториях моря формируются на 76.7–77.0% активностью бактерий *B2*, на 13.6–18.2 – горизонтальным переносом и на 4.7–9.7% – обменом по вертикали. Сбалансированность потоков НП для этих акваторий моря достаточно близка при невязке баланса 16.6–17.1%.

При составлении баланса НП для всего моря из рассмотрения исключаются потоки, определяемые горизонтальным переносом. В целом за год в море поступает 3991.13 тыс. т НП (72.0% – из источников загрязнения в море и 26.7% – за счет обмена по вертикали), а потери НП составляют 4699.73 тыс. т НП (на 93.0% определяются процессами потребления НП бактериями *B2* и на 7% – обменом по вертикали). Невязка баланса между его составляющими вполне приемлема, учитывая неопределенность исходных данных и точность оценки нагрузки по НП, и составляет 16.4%.

Для характеристики загрязнения поверхностных вод для каждого района был рассчитан модуль нагрузки по НП – соотношение суммарных коли-

честв поступающих за год НП в данный район и общего объема его вод (для глубоководных районов принимался средний за год объем поверхностного слоя с учетом его изменения в отдельные месяцы). Значение модуля нагрузки повышено для западных районов 1 и 4 (соответственно 0.690 и 0.787 тыс. т НП/км<sup>3</sup>), что особенно опасно своими последствиями для этих высоко продуктивных районов моря. В районах 2, 3, 5, 6 и 8 значения модуля нагрузки понижены (0.326–0.479 тыс. т НП/км<sup>3</sup>), а в районах 7, 9 и 10 они наибольшие (0.913–1.943 тыс. т НП/км<sup>3</sup>) из-за высоких суммарных поступлений НП.

Рассмотрение модуля нагрузки для укрупненных районов показывает, что его значения возрастают (в 2.9 раза) с севера на юг (составляют 0.572, 0.673 и 1.659 тыс. т НП/км<sup>3</sup> для северной, средней и южной частей моря) и снижаются (в 2.4 раза) с запада на восток (1.378 и 0.580 тыс. т НП/км<sup>3</sup> для западной и восточной акваторий моря). При таком подходе значения модуля нагрузки показывают чисто формальное распределение источников нагрузки по акваториям моря (конкретно соотношение количеств НП, поступающих за год на единицу объемов вод верхнего слоя).

Для всего моря модуль нагрузки по НП на морскую экосистему составляет 0.88 тыс. т НП/км<sup>3</sup>, и это значение в целом не показывает особенности пространственного распределения источников нагрузки, их значимости и последствия для отдельных районов моря. Из всех источников нагрузки можно контролировать теоретически лишь речной сток (вместе с промышленными, муниципальными и сельскохозяйственными стоками), чтобы снизить его роль в нагрузке по НП на водоем. Однако по отношению ко всему водоему роль этого внешнего источника в нагрузке по НП – всего 1.3%. Основное количество НП (72%) поступает в водную среду в самом море из неконтролируемых естественных (грифоны и подводные вулканы) и промышленных (сбросы из крупных промышленных комплексов) источников.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдурахманов Г.М., Мунгиев А.А., Гаджиев А.А. Оценка загрязнения дагестанской части бассейна Каспийского моря. // Матер. Всерос. науч.-практ. конф. “Экология и комплексная проблема охраны Каспийского моря и его побережья”. Махачкала: ДНЦ РАН, 1997. С. 74–77.
2. Айбулатов Н.А. Некоторые проблемы геоэкологии береговой зоны морей России и пути ее решения // Человечество и береговая зона Мирового океана в XXI в. М.: ГЕОС, 2001. С. 40–51.
3. Алиев З.М., Рыбникова В.И., Тетакаева Е.А. Экологические и биотехнологические аспекты утилизации фенола и нефтепродуктов в морской воде Каспия // Матер. Всерос. науч.-практ. конф. “Экология и комплексная проблема охраны Каспийского



- моря и его побережья". Махачкала: ДНЦ РАН, 1997. С. 83–84.
4. Боев А.Г., Матвеев А.Я. Радиолокационный метод оценки параметров нефтяных загрязнений морской поверхности // Исследования Земли из космоса. 2008. № 5. С. 29–36.
  5. Бухарин О.В., Немцева Н.В., Плотников А.О., Яценко-Степанова Т.Н. Бассейн Урала: общая характеристика // Биоиндикация экологического состояния равнинных рек. М.: Наука, 2007. С. 24–32.
  6. Бухарицин П.И., Лулева З.Д. Характеристика качества вод низовьев Волги и Северного Каспия // Вод. ресурсы. 1994. Т. 21. № 4. С. 480–486.
  7. Гаджиев А.А., Абдурахманов Г.М., Мунгиев А.А., Месробиан Н.Х. Программа защиты Каспия от нефтяных загрязнений // Матер. Всерос. науч.-практ. конф. "Экология и комплексная проблема охраны Каспийского моря и его побережья". Махачкала: ДНЦ РАН, 1997. С. 20–22.
  8. Глузов И.Ф., Маловицкий Я.П., Новиков А.А., Секин Б.В. Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря. М.: Недра, 2004. 342 с.
  9. Ежегодник качества морских вод по гидрохимическим показателям за 1989 год. Обнинск: ВНИИГ-МИ-МЦД, 1990. 279 с.
  10. Ежегодник качества морских вод по гидрохимическим показателям за 1992 год. Обнинск: ВНИИГ-МИ-МЦД, 1996. 173 с.
  11. Ежегодник качества морских вод по гидрохимическим показателям за 1993 год. Обнинск: ВНИИГ-МИ-МЦД, 1996. 231 с.
  12. Ежегодник качества морских вод по гидрохимическим показателям за 1994 год. Обнинск: ВНИИГ-МИ-МЦД, 1996. 127 с.
  13. Емельянов В.П., Хоменко А.Н. Оценка загрязненности поверхностных вод бассейна р. Куры по комплексным показателям // Гидрохим. материалы. 1992. Т. 62. С. 145–155.
  14. Зинченко Т.Д. Бассейн Средней и Нижней Волги. Биоиндикация экологического состояния равнинных рек. М.: Наука, 2007. С. 14–24.
  15. Иванов А.Ю. Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исследования Земли из космоса. 2007. № 3. С. 73–96.
  16. Иванов А.Ю., Востоков С.В., Ермошкин И.С. Картографирование пленочных загрязнений морской поверхности по данным космической радиолокации (на примере Каспийского моря) // Исследования Земли из космоса. 2004. № 4. С. 82–92.
  17. Иванов А.Ю., Голубов Б.Н., Затыгалова В.В. О нефтегазоносности и разгрузке полземных флюидов в южной части Каспийского моря по данным космической радиолокации // Исследования Земли из космоса. 2007. № 2. С. 62–81.
  18. Иванов А.Ю., Затыгалова В.В. Картографирование пленочных загрязнений моря с использованием космической радиолокации и географических информационных систем // Исследования Земли из космоса. 2007. № 6. С. 46–63.
  19. Иванов В.П., Власенко А.Д., Катунин Д.Н., Мажник А.Ю. Концепция устойчивого развития и рационального использования биологических ресурсов Каспийского моря // Рыбохозяйственные исследования на Каспии. Результаты НИР за 1998 г. Астрахань: КаспНИРХ, 1999. С. 387–403.
  20. Катунин Д.Н., Курочкина Т.Ф., Насибулина Б.М. и др. Эколого-токсикологическая характеристика Волго-Каспийского бассейна в современных условиях // Рыбохозяйственные исследования на Каспии. Результаты НИР за 1998 г. Астрахань: КаспНИРХ, 1999. С. 26–32.
  21. Качество морских вод по гидрохимическим показателям: ежегодник 2004. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. 200 с.
  22. Костров Б.М., Горбунова Г.С., Магомедов А.К. и др. Эколого-токсикологическая и физиолого-биохимическая характеристика экосистемы Среднего Каспия // Рыбохозяйственные исследования на Каспии. Результаты НИР за 1998 г. Астрахань: КаспНИРХ, 1999. С. 69–74.
  23. Костров Б.П., Магомедов Г.А., Магомедов А.К. и др. Современное состояние загрязнения Среднего и Южного Каспия // Матер. Всерос. науч.-практ. конф. "Экология и комплексная проблема охраны Каспийского моря и его побережья". Махачкала: ДНЦ РАН, 1997. С. 99–100.
  24. Костров Б.П., Магомедов А.К., Панарин А.П. и др. Экологическая обстановка на Дагестанском побережье Каспия // Матер. Всерос. науч.-практ. конф. "Экология и комплексная проблема охраны Каспийского моря и его побережья". Махачкала: ДНЦ РАН, 1997 б. С. 97–99.
  25. Кукса В.И. Южные моря (Аральское, Каспийское, Азовское и Черное) в условиях антропогенного стресса. СПб.: Гидрометеоздат, 1994. 320 с.
  26. Куликова В.Ю. О самоочищении Северного Каспия от нефтяного загрязнения // Биология внутренних вод: проблемы экологии и биоразнообразия. Борок. 2002. С. 124–131.
  27. Курочкина Т.Ф., Насибулина Б.М., Чуйко Е.В. Оценка эколого-санитарного состояния дельты Волги // Каспийский плавучий университет. 2000. № 1. С. 137–138.
  28. Лебедева Е.С. Загрязнение шельфа морей России // Геоэкология шельфа и берегов морей России. М.: Ноосфера, 2001. С. 289–359.
  29. Леонов А.В. Моделирование природных процессов на основе имитационной гидроэкологической модели трансформации соединений С, N, P, Si: Учебное пособие // Южно-Сахалинск: Сахалинский гос. унив-т, 2008. 168 с.
  30. 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.
  31. 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.
  32. Леонов А.В., Фацук Д.Я. Биотрансформация нефтяных углеводородов в Каркинитском заливе Черного моря // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 3. С. 311–326.

33. *Леонов А.В., Чичерина О.В.* Роль микроорганизмов в трансформации соединений органогенных элементов в экосистеме Каспийского моря: оценка с помощью математического моделирования // *Вод. ресурсы.* 2004. Т. 31. № 4. С. 436–450.
34. *Маляев Р.А.* Загрязнение Каспийского моря и его отрицательное влияние на рыбную и другие отрасли народного хозяйства // *Загрязнение Волго–Каспия и перспективы рыбного хозяйства.* Астрахань, 1966. С. 49–62.
35. *Мионов О. Г.* Взаимодействие организмов с нефтяными углеводородами. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 129 с.
36. *Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А., Шарова Ю.Н., Покоева А.Г.* Экотоксикологическая оценка последствий загрязнения вод р. Волги // *Вод. ресурсы.* 2005. Т. 32. № 4. С. 410–424.
37. *Море проблем: опыт системного исследования Каспийского моря.* М.: СОПС, 2001. 183 с.
38. *Научные основы устойчивого и регионального распределения промысловых объектов Каспийского моря.* М.: ВНИРО, 1998. 167 с.
39. *Немировская И.А.* Углеводороды в океане (снег–лед–вода–взвесь–донные осадки). М.: Науч. мир, 2004. 328 с.
40. *Немировская И.А., Айбулатов Д.Н., Артемьев В.А. и др.* Многодисциплинарные исследования р. Волги летом 2009 г. // *Матер. XVIII Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии “Геология морей и океанов”.* М.: ГЕОС, 2009. С. 329–336.
41. *Обзор экологического состояния морей СССР и отдельных районов Мирового океана за 1990 год.* СПб: Гидрометеиздат, 1992. 144 с.
42. *Обзор экологического состояния морей СССР и отдельных районов Мирового океана за 1992 год.* М.: Гидрометеиздат, 1993. 173 с.
43. *Патеев М.Р., Матвеева И.С., Землянов И.В., Сыроешкин А.В.* Динамика загрязнения донных отложений устья реки Терек // *Тр. ГОИН.* 2007. Вып. 208. С. 235–252.
44. *Пахруев С.А.* Сезонная динамика содержания нефтепродуктов на побережье Каспийского моря // *Матер. Всерос. науч.-практ. конф. “Экология и комплексная проблема охраны Каспийского моря и его побережья”.* Махачкала: ДНЦ РАН, 1997. С. 175–176.
45. *Полонский В.Ф., Коршенко А.Н., Остроумова Л.П. и др.* Загрязнение дельты Волги // *Тр. ГОИН.* 2008. Вып. 211. С. 349–368.
46. *Полянинова А. А., Ходоревская Р. П., Красиков Е. В.* Отрицательное влияние загрязнения Каспийского бассейна на популяцию белуги // *Морские гидро-биологические исследования.* М.: ВНИРО, 2000. С. 201–205.
47. *Устьевая область Волги: гидролого-морфологические процессы, режим загрязняющих веществ и влияние колебаний уровня Каспийского моря.* М.: ГЕОС, 1998. 280 с.
48. *Шапоренко С.И.* Загрязнение прибрежных морских вод России // *Вод. ресурсы.* 1997. Т. 24. № 3. С. 320–327.
49. *Ivanov V.A.* Ecological state of the North Caspy and questions of exploitation of oil and gas. A Textbook. Sevastopol’: SPC EKOSY – Gydrophysica, 2003. 136 p.