

Р.Я.Миньковская

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь***ОЦЕНКА ВЫНОСА НЕФТЯНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ
РЕКАМИ В ЧЁРНОЕ МОРЕ**

По стоку рек и неэквидистантным рядам наблюдений за концентрацией нефтяных углеводородов (НУ) в их устьевых створах получены региональные зависимости стока НУ от стока воды и площадей водосборов, приемлемые для балансовых оценок. На основе их анализа впервые выполнено районирование бассейна Чёрного моря по особенностям формирования стока НУ и получена его оценка в современный период (1991 – 2015 гг.): суммарный вынос НУ в море по региональным зависимостям $W_{\text{НУ}} = f(F)$ близок к выносу НУ, рассчитанному за период 1978 – 2012 гг. традиционным методом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *сток нефтяных углеводородов, районирование*

Введение. Одним из основных источников нефтяных углеводородов (НУ) в Чёрном море является речной сток. На его долю приходится около 60 % приходной части баланса НУ [1]. В речные системы эти токсические вещества попадают в результате смыва с территории водосборов во время стокообразующих осадков, при снеготаянии, судоходстве (что характерно для рек Дунай, Днестр, Днепр и Юж. Буг) и сбросе сточных вод населенных пунктов, а также из атмосферы. При этом атмосферные выпадения непосредственно на речную поверхность значительно меньше выпадений на территорию водосбора, а загрязнение рек НУ из других источников недостаточно изучено. Особенно много НУ, хотя и эпизодически, поступает при авариях, утечках, техногенных катастрофах, количество которых со спадом производства, наметившимся в 1991 – 1992 гг., не сократилось, хотя содержание НУ в речной воде (исключая р.Дунай) с этого периода начало существенно уменьшаться [1]. Однако в воде ряда малых рек Крыма и Кавказа концентрация НУ не уменьшилась, а местами и возросла в связи с увеличением рекреационной нагрузки на их бассейны и количества автотранспорта. Оценка выноса НУ речными водами до сих пор является проблематичной из-за недостатка данных наблюдений за их концентрацией в устьевых створах рек. Поэтому разработка способов расчёта выноса НУ с речным стоком и его количественная оценка являются актуальными.

Целью данной работы явилась оценка выноса НУ реками в Чёрное море на основе данных регулярных гидрологических и эпизодических гидрохимических наблюдений. Для этого выполнена систематизация данных наблюдений гидрометеослужб причерноморских государств, проанализированы действующие методики расчёта выноса загрязняющих веществ (ЗВ), получены региональные зависимости выноса НУ от стока рек и площадей речных водосборов и по ним выполнена ориентировочная оценка среднего многолетнего поступления этих загрязняющих веществ в Чёрное море.

Изученность, материалы и методики. Оценка стока НУ выполнена за последний 25-ти летний период (1991 – 2015 гг.). Ранее [1, 2] суммарный

средний многолетний вынос НУ в Чёрное море нами был оценен в 49 (1978 – 2005 гг.) и 41 (1978 – 2012 гг.) тыс. тонн в год. Оценка выполнялась традиционным методом для сохранения преемственности, в соответствии с [3], путём умножения средней многолетней концентрации вещества на средний многолетний сток воды в вершине морских устьев рек. Недостатки данного метода неоднократно рассматривались предшествующими исследователями, в том числе и автором [4 – 6]. По сравнению с литературными данными (также полученными по методике [3]) наша оценка была меньше на 20 – 80 тыс. т.

Анализ более поздних методик, предлагаемых различными руководящими документами [7, 8], показал, что их не всегда можно использовать для оценок выноса НУ из-за недостатка данных наблюдений. В этих случаях в [7, 8] предлагается рассчитывать вынос загрязняющих веществ тем же методом, что и в [3]. В руководящем документе [8] для расчёта величины выноса предполагается наличие систематических гидрохимических наблюдений, связи между концентрацией и расходом воды, сведений об относительной и максимальной погрешности определения осреднённой концентрации НУ в створе, о структурной неоднородности потока веществ, необходимо построение графиков хода концентрации вещества и его выноса в выбранном створе (для визуальной фильтрации экстремальных значений), а также требуются другие, достаточно трудоёмкие, предварительные расчёты по специальному программному обеспечению. При этом критерии исключения экстремумов не указаны и не объясняется, как их исключать, если в году сделано несколько определений (1 – 4), одно из которых минимальное, а другое максимальное. Методика [8] ориентирована на выделение сезонной изменчивости выноса НУ (которое также предлагается делать визуально). Это неприменимо для рек Причерноморья с паводочным режимом стока, залповыми сбросами сточных вод и аварийными разливами нефтепродуктов. Кроме того, сток части рек зарегулирован водохранилищами и прудами, что способствует выравниванию их стока в вершинах устьев рек и затрудняет выделение гидрологических сезонов.

В связи с этим возникла необходимость в разработке иного подхода к оценке выноса НУ и проверке полученных ранее результатов.

Для решения этой задачи использовались данные многолетнего мониторинга на сети наблюдений причерноморских государств, а также материалы, полученные в рамках международного сотрудничества, литературные данные [9 – 14]. Рассмотрены материалы по 82 рекам, впадающим в Чёрное море, его заливы, бухты и лиманы.

Оценка тенденций концентрации НУ выполнялась по критерию Фишера [15, 16] за весь рассматриваемый период наблюдений. Отмеченные разнонаправленные тенденции рассмотрены в работах [1, 2]. В последний 20-ти летний период значимых тенденций концентрации НУ в устьевых створах рек не обнаружено.

Отбор проб воды на содержание НУ осуществлялся на малых реках эпизодически, иногда по сезонам (обычно в одной точке сечения), а в морских устьях рек Дунай, Днепр и Юж.Буг – ежемесячно (исключая ледовый сезон) у поверхности и дна.

Из-за недостаточной освещённости гидрохимическими наблюдениями

устьев рек Грузии, Турции и Болгарии, концентрация НУ в речных водах принималась по немногочисленным публикациям или расчётным путём, как фоновая, а также по рекам-аналогам. Учитывая, что сток малых рек с этих побережий Чёрного моря и содержание в их воде НУ незначительны, т.к. они, в основном, несудоходны, концентрация НУ была принята равной 0,5 ПДК при отсутствии в бассейнах рек крупных хозяйствующих субъектов и населённых пунктов, с развитой инфраструктурой, и равной ПДК при их наличии.

Концентрация НУ определялась экстракционно-ИК-спектрофотометрическим методом (ИКС). В статистических расчётах величины, отклоняющиеся более чем на 3σ (σ – среднее квадратическое отклонение), не учитывались (менее 1 % данных). Расчёт среднего многолетнего выноса НУ выполнялся, в соответствии с методическими указаниями [3, 7], традиционным методом. Полученные результаты дают ориентировочное представление о среднем многолетнем выносе НУ реками в Чёрное море за последние 25 лет.

Далее рассчитанный речной вынос НУ ($W_{\text{НУ}}$) связывался со стоком воды (W) и площадями водосборов рек (F). Получены прямые корреляционные зависимости с сильной корреляционной связью. Коэффициенты корреляции определялись методом Пирсона [15]. Ошибка определения коэффициентов корреляции (m_r) вычислялась по формуле

$$m_r = \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}, \quad (1)$$

где r – коэффициент корреляции (корреляционное отношение); n – длина ряда.

Ошибка коэффициента корреляции изменялась от 0 до 17 %.

Оценка качества статистических связей выполнялась, в соответствии с рекомендациями [8], по формуле

$$m_{\text{св}} = S_{\text{св}}/\sigma, \quad (2)$$

где $m_{\text{св}}$ – категория качества связи; $S_{\text{св}}$ – среднеквадратическая погрешность проверочных расчётов концентрации НУ, мг/л; σ – среднее квадратическое отклонение, мг/л. Согласно критериям оценки качества полученных зависимостей [8], категории качества связей были равны 0,40 – 0,45, что соответствует оценке «хорошее».

Оценка выноса НУ с речным стоком в Чёрное море. Анализ зависимостей между стоком воды рек и концентрацией НУ в их воде, выполненный по рекомендации [8], показал, что связь между этими характеристиками отсутствует, т.к. коэффициенты корреляции не превышали 0,25. Также полностью отсутствует какая-либо зависимость между концентрацией НУ и их выносом в море, что свидетельствует о малом вкладе концентрации в величину выноса НУ.

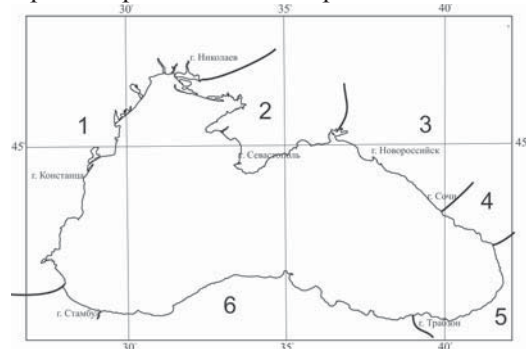
В ходе исследования установлено, что имеются статистически значимые зависимости между стоком воды рек (W) и площадями их водосборов (F), выносом НУ ($W_{\text{НУ}}$) и стоком воды рек, а также между выносом НУ и площадями водосборов. Причём, такие зависимости получены как для всех рассмотренных рек бассейна Чёрного моря, так и для рек по его отдельным районам, имеющим региональные особенности формирования стока. В соответствии с критериями, приведенными в табл.1 в РД 52.24.748-2010 [8], качество полученных связей хорошее, коэффициенты корреляции и корреля-

ляционные отношения составляли 0,86 – 1,0. Наличие полученных зависимостей $W_{HY} = f(W)$ и $W_{HY} = f(F)$ обусловлено тем, что большей площади водосбора (за небольшим исключением) соответствуют большие площади загрязнения НУ из различных источников и смыва, а также большая величина поступления этих загрязняющих веществ в устья рек.

При районировании по особенностям указанных зависимостей выделено 6 районов побережья Чёрного моря (рис.1).

Вынос НУ в Чёрное море значимых тенденций не имел, так как его основная составляющая, сток рек, за рассматриваемый период не имел трендов. Однако, начиная с 1992 г., у нижних границ больших рек (Дунай, Днепр, Днестр) обнаружены значимые тенденции уменьшения концентрации НУ, в среднем на 0,004 – 0,02 мг/л в год. Но указанные тенденции в вершинах морских устьев больших трансграничных рек (исключая р.Днепр) не прослеживаются. Следовательно, уменьшение загрязнённости воды низовьев больших рек бассейна обусловлено снижением уровня хозяйственной деятельности в бассейнах рек Северо-Западного района Чёрного моря. В устьях малых рек о тенденциях сделать однозначные выводы затруднительно, так как ряды наблюдений для этого недостаточны. Но так как загрязнённость малых рек намного меньше, чем больших, потому что они несудоходны, их вклад в суммарный вынос НУ реками несущественен.

Анализ качества речной воды показал, что наиболее загрязнёнными НУ являются большие и средние судоходные реки (Дунай, Днепр, Днестр и Юж. Буг) первого, Северо-Западного района моря. Здесь концентрация НУ изменялась от 0,03 до 0,39 мг/л, а в среднем составляла 0,12 мг/л. В воде рек Крыма средняя концентрация была ниже ПДК и составила 0,011 мг/л. В



Р и с . 1 . Районирование водосбора Чёрного моря по особенностям выноса НУ: Северо-Западный район моря, включая реки Днепр (Украина) и Резовска (Болгария) (1); реки Крыма (Россия) (2); Восточный район, включая реки Сукко и Мзымта (Россия) (3); Восточный район, между реками Псоу (Россия – Абхазия) и Галидзга (Абхазия) (4); Юго-Восточный район, включая реки Окуми (Абхазия) и Харшит (Турция) (5); Южный район, между реками Харшит (Турция) и Резовска (Болгария) (6).

третьем районе (рис.1) большинство рек (85 %) были загрязнены НУ в пределах ПДК, средняя концентрация НУ в их воде в среднем была равна 0,03 мг/л. Такая же средняя концентрация НУ была характерна для района 4, где все реки практически не были загрязнены НУ в сверхнормативных концентрациях. В пятом районе концентрация НУ достигала и несколько превышала ПДК в реках Ингури и Чорохи, в воде остальных рек превышение ПДК не отмечалось, средняя концентрация составляла 0,02 мг/л. В реках Турции средняя концентрация была на уровне ПДК и ниже, в среднем составляла 0,03 мг/л.

Так как в устья рек НУ поступают транзитом, в эмульгированном виде, а местные источники

Т а б л и ц а 1. Формулы для расчёта выноса НУ реками в зависимости от стока рек и площадей водосборов.

№ района	зависимость выноса НУ ($W_{НУ}$)			
	от стока рек (W)		от площади водосбора (F)	
1	$W_{НУ} = 0,13 W$	(0,99 ± 0,03)	$W_{НУ} = 3 \cdot 10^{-5} F$	(0,99 ± 0,03)
2	$W_{НУ} = 10^{-5} e^{59,7W}$	(0,91 ± 0,05)	$W_{НУ} = 10^{-6} F + 3 \cdot 10^{-6}$	(0,86 ± 0,15)
3	$W_{НУ} = 0,011 W + 0,002$	(0,95 ± 0,01)	$W_{НУ} = 2 \cdot 10^{-5} F$	(0,99 ± 0,02)
4	$W_{НУ} = 0,02 W$	(0,99 ± 0,007)	$W_{НУ} = 4 \cdot 10^{-5} F$	(1,00 ± 0,00)
5	$W_{НУ} = 0,03 W$	(0,87 ± 0,04)	$W_{НУ} = 2 \cdot 10^{-5} F$	(1,00 ± 0,00)
6	$W_{НУ} = 0,054 W - 0,063$	(0,92 ± 0,04)	$W_{НУ} = 0,10 \ln F - 0,86$	(0,99 ± 0,04)

Примечание: в скобках показаны коэффициенты корреляции, корреляционные отношения и ошибки их расчёта.

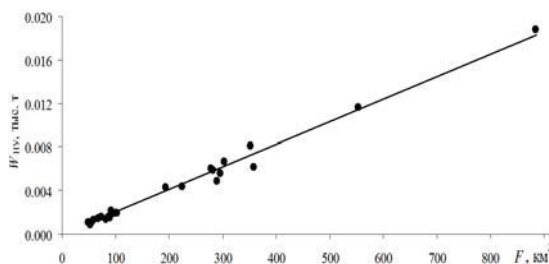
существенной роли не играют, многолетняя изменчивость их концентрации и её вклад в вынос с речным стоком меньше, чем стока рек; загрязнённость НУ в устьевых створах рек носит фоновый характер, и полученные связи между стоком воды и выносом НУ близки к функциональным (табл.1, рис.2). Во всех районах Чёрного моря основным фактором выноса НУ является речной сток.

Большинство полученных расчётных зависимостей являются прямо пропорциональными линейными, коэффициенты корреляции высокие, а их ошибки незначительные (табл.1). Наилучшие связи получены для Северо-Западного и Восточного районов Чёрного моря (средние отклонения значений от линий связи не превышали 9 %, максимальные достигали 18 %), наихудшие – для рек Крыма и Южного района (средние ошибки составляли 22 – 60 %, максимальные достигали 86 – 100 %). Пониженное качество зависимостей в этих районах объясняется сложностью гидрологического режима и недостатком данных.

Следовательно, представленные в табл.1 зависимости выноса НУ от стока рек или площадей водосборов можно использовать для ориентировочной оценки выноса НУ в Чёрное море.

Расчёт выноса НУ выполнен по стоку рек и по площадям водосбора. Сравнительный анализ полученных результатов представлен в табл.2.

Как видно из табл.2, ориентировочная оценка выноса НУ для районов 3 – 6 может быть выполнена как по стоку рек, так и по площадям их водосборов, а для районов 1 и 2 ошибка расчёта будет меньше, если в качестве предиктора использовать площадь водосбора (F). Суммарный вынос НУ в море за последний 25-ти летний период (44,6 тыс. т) на 3,6 тыс. т больше, чем за период 1978 – 2012 гг. [1]. Оценка суммарного выноса НУ реками



Р и с . 2. Зависимость между площадями водосборов (F) и выносом НУ ($W_{НУ}$) для Восточного района Чёрного моря (район 3 на рис.1), включая реки Сукко и Мзымта.

Т а б л и ц а 2. Сравнительный анализ результатов оценки выноса НУ (тыс. т) различными способами.

№ района	по [3]	по зависимостям $W_{НУ} = f(F)$	отклонение, %	по зависимостям $W_{НУ} = f(W)$	отклонение, %
1	42,1	43,8	4	33,4	- 21
2	0,002	0,002	0	0,001	- 45
3	0,10	0,10	0	0,10	0
4	0,28	0,27	- 4	0,26	- 7
5	1,02	1,06	4	1,02	0
6	1,10	1,11	1	1,12	2
всего	44,6	46,3	4	35,9	- 20

по методике [3], приведенная в табл.2, отличается от выноса, полученного по зависимостям на 4 – минус 20 %. От более ранних оценок [1] полученные результаты отличаются незначительно: в пределах точности расчётов (9 %) при использовании зависимости $W_{НУ} = f(F)$ и на минус 12 % – при расчёте выноса НУ по стоку воды.

Выводы. Сравнение результатов оценки выноса нефтяных углеводородов с речным стоком в Чёрное море, полученных традиционным методом (44,6 тыс. т), с рассчитанными по предложенным зависимостям (от площадей водосборов) значениями $W_{НУ}$, показало их удовлетворительную сходимость (максимальные расхождения составили около 4 %).

Следовательно, при отсутствии данных наблюдений за концентрацией в вершинах морских устьев рек для ориентировочных оценок выноса НУ в море допустимо использовать площади водосборов рек.

Суммарный вынос НУ в море за последний 25-ти летний период, оцененный по региональным зависимостям $W_{НУ} = f(F)$, составил 46,3 тыс. т, что на 5,3 тыс. т больше, чем вынос, рассчитанный за период 1978 – 2012 гг. традиционным методом.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0010 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей на основе современных методов контроля состояния морской среды и гридтехнологий».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миньковская Р.Я. О загрязнении нефтяными углеводородами поверхностного слоя воды Чёрного моря // Метеорология и гидрология.– 2014.– вып.10.– С.89-98.
2. Миньковская Р.Я. Вынос загрязняющих веществ в моря большими реками / Атлас охраны природы Чёрного и Азовского морей / Под ред. Митина Л.И.– СПб.: ГУНиО МО РФ, ЦКФ ВМФ, 2006.– С.220-222.
3. Методические рекомендации по обоснованию системы наблюдений и расчету выноса с речным стоком нефтепродуктов.– Л.: Гидрометеиздат, 1990.– 20 с.
4. Миньковская Р.Я. Оценка выноса нефтяных углеводородов речными водами // Диагноз состояния среды прибрежных и шельфовых зон Чёрного моря.– Севастополь: МГИ НАНУ, 1996.– С.82-91.

5. *Миньковская Р.Я., Демидов А.Н.* Мониторинг нефтяного загрязнения Чёрного моря // Междунар. науч.-технич. семинар «Фундаментальные и прикладные проблемы мониторинга и прогноза стихийных бедствий». 14-18.09 1998 г., Севастополь.– Киев: Знание, 1998.– Ч.II.– С.7-13.
6. *Миньковская Р.Я., Демидов А.Н.* Предложения по расчету выноса загрязняющих веществ реками // V междунар. науч.-практ. конф. «Вода: проблемы и решения». 21-22.09 1999 г., Днепропетровск.– Днепропетровск: «Гамалія», 1999. – С.53-57.
7. *РД 52.24.508-96.* Методические указания. Организация и функционирование подсистемы мониторинга состояния трансграничных поверхностных вод суши. – Росгидромет.– СПб: Гидрометеиздат, 1999.– 20 с.
8. *РД 52.24.748-2010.* Усовершенствованная методика определения выноса (переноса) загрязняющих веществ с речным стоком.– Росгидромет.– Р-н-Д, 2010.– 69 с.
9. *Государственный водный кадастр / Ежегодные гидрохимические данные о качестве морских вод.*– Севастополь, СОГОИН, МО УкрНИГМИ, 1978 – 2005, ч.1 (Чёрное и Азовское моря, Севастопольская бухта), в 24 т.
10. *Государственный водный кадастр / Ежегодные данные о качестве поверхностных вод суши.*– Киев: ДОД Госкомгидромета, 1983 – 2012, ч. 1 (Реки и каналы. Украина). вып.3, в 40 т.
11. *Государственный водный кадастр. Раздел 1. Поверхностные воды. / Ежегодные данные о качестве поверхностных вод суши.* – Симферополь, КрымЦГМ, 1982 – 2012, т. II, вып.3, ч.1 (Реки и каналы), в 24 т.
12. *Государственный водный кадастр. Раздел 1. Поверхностные воды. Серия 2 / Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек.*– Севастополь: МО УкрНИГМИ, 1982 – 2012, ч.2 (Устья рек), в 26 т.
13. *Качество морских вод по гидрохимическим показателям / Ежегодник.*– Обнинск, «Артифекс», 2003 – 2010.
14. *Часовников В.К., Гибца Я.В., Эжба Я.А. и др.* Уровень загрязнения нефтепродуктами в Российском и Абхазском секторе Черного моря / Труды XXIV Международной береговой конференция «Морские берега – эволюция, экология, экономика».– Туапсе, 2012.– С.99-103.
15. *Рождественский А.В., Чеботарев А.И.* Статистические методы в гидрологии.– Л.: Гидрометеиздат, 1974.– 424 с.
16. *ГОСТ Р 50779.10-2000 (ИСО 3534.1-93)* Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения. Введен 2001-07-01.– М.: Стандартинформ, 2008.– 46 с.

Материал поступил в редакцию 31.03.2017 г.
После доработки 01.09.2017 г.

R. Ya. Min'kovskaya

EVALUATION OF OIL HYDROCARBONS TRANSPORT BY RIVERS INTO THE BLACK SEA

The regional dependence of oil hydrocarbons discharge and watershed area is obtained to accept balance evaluations using river runoff and non-uniform observations of oil hydrocarbons concentration in estuarine. Based on their analysis the zoning of the Black Sea is proposed according to the peculiarities of oil hydrocarbons runoff. Transport of oil hydrocarbons is estimated in the modern period (1991 – 2015), namely: the total oil hydrocarbons transport in the sea by regional dependencies $W_{OH} = f(F)$ is close to the oil hydrocarbons transport calculated by traditional method for 1978 – 2012.

KEYWORDS: oil hydrocarbons discharge, zoning