УДК 502.3.7 *DOI: 10.35567/1999-4508-2017-6-7*

ОБОСНОВАНИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НОРМАТИВОВ ДОПУСТИМЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРИБРЕЖНЫЕ МОРСКИЕ АКВАТОРИИ

© 2017 г. Н.Н. Бортин, В.М. Милаев, А.М. Горчаков

ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Дальневосточный филиал, г. Владивосток, Россия

Ключевые слова: прибрежные морские акватории, загрязняющие вещества, концентрации, экологическая нагрузка, ассимиляционное качество воды, водообмен, нормативы допустимых воздействий.

Представлены обзор и анализ современных научно-методических подходов к определению нормативов предельно допустимых вредных воздействий по привносу химических и взвешенных веществ на прибрежные морские акватории. Рассмотрена модель баланса концентраций загрязняющих веществ, приведенных к объему исследуемого участка морской акватории, с наложением ограничивающих условий, определяющих сохранение нормального состояния морской среды. Определены элементы баланса загрязняющих веществ, поступающих в морские прибрежные акватории со сточными промышленными и коммунальными водами и в результате диффузного (неорганизованного) речного стока, а также притока загрязняющих веществ при водообмене расчетного участка с соседним участком моря.

Проанализирован экологический подход к проблеме определения нормативов предельно допустимых вредных воздействий, основанный на использовании понятий о предельно допустимой экологической нагрузке, предельно допустимых вредных воздействиях и ассимиляционной емкости моря. Представлено обоснование методологии определения нормативов по химическим и взвешенным веществам для отдельных участков прибрежных морских акваторий и бухт с различными характеристиками водообмена.

Под нормативами предельно допустимых вредных воздействий (НДВ) на водные объекты подразумевается система показателей качества воды, при соблюдении которых выполняются все санитарно-гигиенические, экологические и другие требования, обеспечивающие оптимальные условия жизнедеятельности биоты и человека.

Воздействия на природную (жизнеобеспечивающую) среду носят разнообразный характер. К основным видам воздействий относятся: поступ-

ление химических и взвешенных веществ; микроорганизмов; фито- и зоопланктона; водной растительности; радиоактивных веществ; тепловое загрязнение; привнос воды; забор (изъятие) водных ресурсов.

Целью данной работы является обоснование методологии определения НДВ по химическим и взвешенным веществам для ограниченных частей прибрежных морских акваторий и отдельных бухт с любыми характеристиками водообмена. Для обоснования методических подходов установления НДВ использованы основные принципы и положения Методических указаний по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты [1] и Правил разработки и утверждения нормативов ПДК и ПДВВ на морскую среду внутренних морских вод Российской Федерации [2].

Количественно значение НДВ по химическим и минеральным веществам ($НДВ_{хим}$) определяется формулировкой: «…суммарная масса загрязняющих веществ (ЗВ), которая максимально допустима на расчетном участке водного объекта в пределах установленного периода времени, когда концентрация ЗВ в замыкающем отборе и в среднем по участку не превышают нормативы качества воды, установленные для водного объекта или его участка» [1]. За нормативы качества воды акватории прибрежных вод принимаются значения ПДК для водного объекта. В соответствии с формулировкой понятия $НДВ_{хим}$, его величина может быть выражена в форме:

$$НДВ_{хим\,i} = (ПДК - C_{ф})_i \cdot V, \quad (1)$$

где $НДВ_{хим\,i}$ – нормативы допустимого воздействия по *i*-му веществу;

ПДК – предельно допустимые концентрации химических веществ (принимаются равными $ПДК_{рх}$ для морских вод);

$C_{ф\,i}$ – фактическая концентрация ЗВ, средняя по акватории за расчетный период;

V – объем морской акватории в пределах ограниченного расчетного участка.

$$C_{ф} = C_{фон} + \Delta C, \quad (2)$$

где $C_{фон}$ – фоновая концентрация вещества (концентрация за пределами участка вне влияния береговых сбросов ЗВ и в пределах акватории);

ΔC – изменение концентрации ЗВ за счет береговых сбросов, сбросов в пределах акватории и внутриводоемных процессов.

Значение ΔC для участка моря в пределах акватории ограниченной части участка определяется балансом загрязняющих веществ.

Модель баланса загрязняющих веществ

Баланс концентраций загрязняющих веществ, приведенных к объему исследуемого участка морской акватории (например, $C_{б} = C_{б}'' \cdot V_{б}/V$, где $C_{б}''$ – фактическая концентрация ЗВ, а $V_{б}$ – объем сточных вод), в целом может

быть выражен алгебраической суммой приносимых и выносимых масс веществ в виде:

$$\Delta C = (C_б + C_р + C_м + C_в + C_г + C_а) - (C'_в + C_{рх} + C_{рб} + C'_г + C'_а), \quad (3)$$

где ΔС — приращение концентрации загрязняющего вещества за время Δt за счет: поступления с водосборной территории, включая ливневой сток и сточные воды предприятий ($C_б$); выноса речным стоком ($C_р$); сброса непосредственно в море с судов, эстакад и т. д. ($C_м$); притока (оттока) за счет водообмена с прилегающей акваторией моря ($C_в$ и $C'_в$); разложения химического ($C_{рх}$); разложения биохимического ($C_{рб}$); притока (оттока) на границе фаз вода–атмосфера ($C_а$ и $C'_а$); притока (оттока) на границе фаз вода– грунты ($C_г$ и $C'_г$).

Сохранение нормального состояния морской среды требует наложения ограничивающих условий:

$$0 < C_i \le ПДК_i \quad (4)$$

где $ПДК_i$ и C_i – предельно допустимая концентрация i-го вещества и концентрация исследуемого вещества соответственно. При $\Delta C_i \le 0$ расчет нормативов не производится.

Разработка общих моделей расчета баланса и динамики уровней загрязнения морских вод изложена в работах [3, 4].

Уравнение для расчета средней концентрации загрязняющих веществ в море на момент времени t+1 имеет следующий вид:

$$C_{t+1} = C_t + \Delta C = C_t + M_{t+1}/V_{t+1} - M_t/V_t, \quad (5)$$

где M – масса загрязняющего вещества.

Масса вещества и его концентрация связаны соотношением:

$$M = C \cdot V, \quad (6)$$

где V – объем воды расчетного участка.

$$C_{t+1} = C_{t^*}(1 - \Delta V_t/V_{t+1}) + \Delta M_t/V_{t+1}, \quad (7)$$

где C_t и C_{t+1} – концентрации вещества;

M_t и M_{t+1} – массы вещества;

V_t и V_{t+1} – объем исследуемой части морской акватории на моменты времени t и t+1;

ΔM_t и ΔV_t – приращение массы вещества и объема исследуемой части акватории за период времени от t до t+1

Первый член правой части уравнения учитывается при изменении объема исследуемого участка акватории за счет уменьшения речного стока. В окраинных морях выражение $(1 - \Delta V_t/V_{t+1})$ близко к единице, поэтому уравнение (5) примет вид:

$$C_{t+1} = C_t + \Delta M_t / V_{t+1}, \quad (8)$$

Уравнение баланса можно выразить через изменение массы загрязняющих веществ за расчетный период (сезон, год):

$$\Delta M = \Sigma M_{\text{пр}} - \Sigma M_{\text{расх}}, \quad (9)$$

где $\Sigma M_{\text{пр}}$ – сумма приходных статей;

$\Sigma M_{\text{расх}}$ – сумма расходных статей баланса загрязняющих веществ.

Если массу загрязняющих веществ, изменяющуюся на расчетном участке морской акватории со временем обозначить через M_t, а исходную массу через M_0, получим следующий вариант уравнения баланса:

$$\Delta M_t = M_t - M_0. \quad (10)$$

Скорость поступления загрязняющих веществ в море за единицу времени рассчитываем по формуле:

$$q_t = M_{\text{пр}} / t \text{ (кг/с)}. \quad (11)$$

Одновременно с поступлением загрязняющих веществ в море происходит их распад, переход в грунты, атмосферу и при водообмене в соседние акватории. Каждый из этих процессов характеризуется своим коэффициентом скорости K (безразмерная величина), принимаемым постоянным за расчетный промежуток времени. Если сумму коэффициентов для загрязняющего вещества обозначить через ΣK, то его баланс можно описать уравнением вида:

$$\Delta M_t = \Sigma K \cdot q_t \cdot t - M_0 \quad (12)$$

По формуле (12) для определенных условий может быть рассчитан баланс каждого из загрязняющих веществ в однослойных и многослойных морских системах при выполнении следующих условий: расчет проводится по средневзвешенным концентрациям загрязняющих веществ и средним месячным температурам для всего избранного пространства моря, допускается непрерывность и однородность полей загрязнения во всем море или его районе, принимается равномерность притока загрязняющих веществ во времени от различных источников по всей акватории. Поток загрязняющих веществ на нижней границе поверхностного слоя принимается пропорциональным вертикальному градиенту концентраций и осуществляется в сезоны развития вертикальных конвекций. В случае концентрирования загрязняющих веществ в пленках и поверхностном микрослое (ПМС), расчет их баланса проводится для пленок, ПМС и подстилающих слоев воды в отдельности из предположения, что большая часть загрязняющих веществ проходит стадию концентрирования в ПМС или пленке.

Элементы баланса загрязняющих веществ

Суммарный сброс загрязняющих веществ в море со сточными промышленными и коммунальными водами за счет диффузного (неорганизованного) и речного стока представим уравнением вида:

$$M_с = M_{ст} + M_{стн} + M_д + M_ч, \quad (13)$$

где $M_{ст}$ – поступление веществ с контролируемым сбросом сточных вод с водосбора;

$M_{стн}$ – поступление веществ с неконтролируемым сбросом сточных вод с водосбора;

$M_д$ – поступление веществ с водосбора за счет диффузного (неорганизованного) сброса;

$M_ч$ – поступление веществ с речным стоком.

Масса поступающего вещества с речным стоком M_i определяется, исходя из концентрации вещества (C_i) и объема воды за время Δt по формуле:

$$M_i = C_i \cdot Q_{\Delta t} \cdot \Delta t, \quad (14)$$

где C_i – средняя концентрация i-го вещества за расчетный период;

$Q_{\Delta t}$ – средний расход воды в реке за расчетный период Δt.

Поступление вещества с сосредоточенным контролируемым сбросом $M_{сті}$ (в т. ч. и ливневых вод с предприятий) определяется по данным статотчетности предприятий и бассейновых водных управлений. Поступление вещества с неконтролируемым сбросом сточных вод с водосбора $M_{стні}$ определяется по данным экспериментальных наблюдений или по литературным данным и экспертным оценкам.

Под неорганизованным сбросом сточных вод подразумевается ливневой сток с территории водосбора, предприятий, организаций и прилегающей инфраструктуры. Неорганизованный сброс состоит из стока дождевых, талых и поливочных вод за пределы территории образования по естественному уклону местности в кюветы дорог, овраги, непосредственно в реки, ручьи, пруды и иные водные объекты.

Расчет неорганизованного сброса ЗВ может быть произведен по методике и данным, приведенным в [5, 6]. Сброс ЗВ с речным стоком $M_{чi}$ определяется по данным натурных наблюдений по формуле (14).

Приток загрязняющих веществ при водообмене расчетного участка с соседним участком моря вычисляем по формуле:

$$m_в = \overline{C}_1 \cdot \overline{V}_1, \quad (15)$$

где $\overline{C}_1$ – средняя концентрация загрязняющих веществ в предпроливном пространстве прилегающего к расчетному участку моря;

$\overline{V}_1$ – приток воды из соседнего участка моря при водообмене за период Δt.

Если имеются данные наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в атмосферных осадках, то при равномерном распределении осадков над морской акваторией их приход из атмосферы за время Δt рассчитывается по формуле:

$$m_{а} = \overline{C}_{ос} \cdot \overline{V}_{ос}. \quad (16)$$

Влияние грунтов проявляется в мелководных и прибрежных районах морских акваторий. Приток загрязняющих веществ из донных отложений при взмучивании дает увеличение концентраций растворенных и эмульгированных нефтепродуктов в поверхностном слое:

$$m_{г} = (C_{шт} - C_{до\ шт}) \cdot h \cdot S \cdot n, \quad (17)$$

где $C_{шт}$ и $C_{до\ шт}$ – концентрации ЗВ в воде в период шторма и до шторма;

h и S – средняя глубина и площадь исследуемого района моря;

n – число штормовых суток за расчетный период.

Отток загрязняющих веществ при водообмене с соседними акваториями рассчитывается по формуле:

$$m'_{в} = \overline{C}_{2} \cdot \overline{V}_{2}, \quad (18)$$

где $\overline{C}_{2}$ и $\overline{V}_{2}$ – средняя концентрация загрязняющих веществ в предпроливном пространстве моря и средний отток воды при водообмене за период Δt соответственно.

Расход загрязняющих веществ при химическом и биохимическом разложении ($m_{рх} + m_{рб}$) можно ориентировочно рассчитать, зная начальную массу веществ, среднемесячную температуру воды и соответствующие температуре суммарные константы скоростей реакций. Эти константы в наибольшей мере зависят от температуры воды, при незначительном влиянии солености и pH. Практическое приложение моделей баланса и динамики уровней загрязнения морских вод сопровождается рядом затруднений, поскольку многие необходимые для расчета параметры к настоящему времени еще слабо изучены и определены недостаточно точно.

Другой подход к проблеме определения НДВ заключается в использовании понятий о предельно допустимой экологической нагрузке (ПДЭН), предельно допустимых вредных воздействиях (ПДВВ) и ассимиляционной емкости моря [7–10]. Количественные значения понятий ПДВВ и ПДЭН соответствуют минимальной ассимилирующей способности водного объекта и величине $НДВ_{хим}$ [6]. При экологическом подходе к определению допустимых нагрузок загрязняющими веществами ($НДВ_{хим}$) учитывается влияние вредных факторов не на отдельный организм, а на реакцию биоценоза и экосистемы в целом. Главным критерием выступает устойчивость системы. Для каждой экосистемы должны быть выявлены собственные критерии качества природной среды, зависящие от ее экологического резерва и от экологических возможностей региона [9].

В основе разработки экологических нормативов лежит теоретическая концепция системного подхода к регулированию качества природной среды. Как результат системного подхода выступают развитые в работах [9, 10] представления о ПДЭН загрязнения на данную экосистему. Значение ПДЭН опирается на понятие устойчивости экосистем, поскольку их нормальное функционирование в условиях загрязнения возможно лишь при непревышении ПДЭН, которая выводится с учетом всех факторов комбинированного и комплексного воздействия на конкретную экосистему.

В настоящее время определены общие принципы обоснования ПДЭН, реализуемые, например, через разработку концепции ассимиляционной емкости экосистем. Для обоснования ПДЭН необходим всесторонний анализ окружающих природных сред, в основе которого лежит система долгосрочного наблюдения за уровнем и характером загрязнения. В общей системе мониторинга большая роль принадлежит выявлению откликов биотических компонентов экологических систем на воздействие загрязнений. Второй этап всестороннего анализа окружающей природной среды заключается в определении экологически допустимых нагрузок и воздействий на отдельные организмы, популяции, экосистемы, биосферу и выработке экологических норм допустимых нагрузок. Критическим звеном всей экосистемы может оказаться тот или иной вид организмов (экологическая мишень), чувствительный к данному фактору. Этот вид и будет определять нагрузку на систему в целом.

Действующие в нашей стране рыбохозяйственные ПДК разработаны для пресноводных бассейнов. Распространение таких ПДК на морские воды порой приводит к «парадоксальным» выводам. Например, ПДК цинка равна 10 мкг/л, что ниже средней концентрации этого элемента в Мировом океане, а если учесть повышенное содержание микроэлементов в шельфовых зонах и морях, может сложиться впечатление о загрязнении Мирового океана цинком до опасных пределов. На самом деле этого нет.

Согласно основным положениям биогеохимии и геохимической экологии, организмы и биоценозы эволюционно адаптировались к химическим факторам среды. Поэтому есть основания утверждать, что существующие в настоящее время средние концентрации металлов в Мировом океане оптимальны для его биотического населения, а крайние пределы отражают критические уровни недостаточного (если элемент нужен для жизнедеятельности) или избыточного (если элемент токсичен) содержания металлов в морской воде. Последний уровень является естественной, эволюционно обусловленной границей зоны максимально допустимого содержания металла для всего населения Мирового океана.

Сопоставление морских и рыбохозяйственных пресноводных $ПДК_{рх}$ показывает, что в некоторых случаях они совпадают, но чаще различаются до

10 раз. Причины различий связаны как с разной методикой нормирования, так и со спецификой химического состава биотопов морского населения и особенностями физиологии морских организмов.

Как следует из исследований [9, 10], ассимиляционная емкость морской экосистемы (A_i) по данному загрязняющему веществу *i* (или сумме загрязняющих веществ) и для m-экосистем – это максимальная динамическая вместимость такого количества загрязняющих веществ (в пересчете на всю зону или единицу объема морской экосистемы), которое может быть за единицу времени накоплено, разрушено, трансформировано (биологическими или химическими превращениями) и выведено за счет процессов седиментации, диффузии или любого другого переноса за пределы объема экосистемы без нарушения ее нормального функционирования.

Суммарное удаление (A_i) загрязняющего вещества из морской экосистемы в соответствии с [11] записывается в виде:

$$A_i = K_i \frac{V}{\tau_i} \bar{C}_i, \qquad (19)$$

где K_i – коэффициент запаса, отражающий экологические условия протекания процесса загрязнения в различных зонах морской экосистемы;

τ_i – время пребывания загрязняющего вещества в морской экосистеме.

Согласно определению ассимиляционной емкости, она равна максимальному значению A_i при сохранении экологического благополучия в экосистеме. Это условие соблюдается при $\bar{C}_i \le C_{0i}$, где C_{0i} – критическая концентрация загрязняющего вещества в морской воде. Отсюда ассимиляционная емкость может быть оценена по формуле (19) при $\bar{C}_i \le C_{0i}$.

Все величины, входящие в правую часть уравнения (19), можно непосредственно представить по данным, полученным в процессе долгопериодных комплексных исследований состояния морской экосистемы [9–11]. При этом последовательность определения ассимиляционной емкости морской экосистемы к конкретным загрязняющим веществам включает три основных этапа:

– расчет балансов массы и времени жизни загрязняющих веществ в экосистеме;

– анализ биотического баланса в экосистеме;

– оценка критических концентраций воздействия загрязняющих веществ (или экологических ПДК) на функционирование биоты.

Для решения вопросов экологического нормирования антропогенных воздействий на морские экосистемы расчет ассимиляционной емкости наиболее репрезентативен, поскольку он учитывает критические концентрации воздействия загрязняющих веществ, имеющие более высокое экологическое обоснование по сравнению с гигиеническими или рыбохозяй-

ственными ПДК. При известной ассимиляционной емкости предельно допустимая экологическая нагрузка (ПДЭН) водоема ЗВ рассчитывается достаточно просто. Так, при стационарном режиме загрязнения водоема ПДЭН будет равна ассимиляционной емкости.

С учетом того, что поступление загрязняющих веществ в морские прибрежные акватории в определенной степени связано с притоком речных вод, расчет НДВ в соответствии с [1] рекомендуется вести дифференцированно по основным гидрологическим сезонам. Для условий юга Дальнего Востока это:

– весенне-летние паводки (апрель–сентябрь),
– осенняя межень (октябрь–ноябрь),
– зимняя межень (декабрь–март).

$НДВ_i$ в годовом разрезе определяется для условного года с критическими условиями формирования качества как сумма сезонных значений, рассчитанных по формуле:

$$НДВ_i = НДВ_{i\ зим,\ 95\ \%} + НДВ_{i\ вес\text{-}лет,\ 50\ \%} + НДВ_{i\ осень,\ 95\ \%}, \quad (20)$$

где $НДВ_i$ – норматив допустимого воздействия по *i*-му веществу.

Анализ современных научно-методических подходов к определению нормативов предельно допустимых вредных воздействий (НДВ) по привносу химических и взвешенных веществ на прибрежные морские акватории показал, что в основе расчета НДВ должна лежать модель баланса загрязняющих веществ, учитывающая динамику всех процессов, происходящих в исследуемой части акватории, включая водообмен и самоочищение.

При выборе метода определения НДВ следует руководствоваться наличием и полнотой исходной информации. Исходная информация для расчетов по приведенным в статье формулам может быть получена по материалам натурных наблюдений, литературным и справочным данным, расчетным путем (по известным методикам). При отсутствии или недостаточности информации – методом экспертных оценок.

Учитывая, что поступление загрязняющих веществ в морские прибрежные акватории в определенной степени связано с притоком речных вод, расчет НДВ для прибрежных морских акваторий рекомендуется вести дифференцированно, по основным гидрологическим сезонам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты и методика «Расчет нормативов допустимого воздействия по привносу химических веществ (НДВхим)». М.: МПР РФ, 2007. 46 с.
2. Правила разработки и утверждения нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ и нормативов предельно допустимых вредных

воздействий на морскую среду и природные ресурсы внутренних морских вод и территориального моря Российской Федерации. Утв. постановлением Правительства РФ от 10 марта 2000 г., № 208. 3 с.
3. Проблемы химического загрязнения вод Мирового океана. Л.: ГМ, 1985. Т. 1. Динамика и прогноз загрязнения океанических вод / под ред. А. И. Симонова. 144 с.
4. Процессы самоочищения морских вод от химических загрязнений / под редакцией А. И. Симонова / Труды ГОИН, 1978. Вып. 128. 102 с.
5. Методические указания по расчету платы за неорганизованный сброс загрязняющих веществ в водные объекты. Госкомитет РФ по охране окружающей среды. М. 1998. 28 с.
6. *Алексеев М.И., Курганов А.М.* Организация отведения поверхностного (дождевого и талого) стока урбанизированных территорий / уч. пособие. М.: Изд-во АСВ, 2000. 352 с.
7. *Беляев В.И., Худошина М.Ю.* Основы логико-информационного моделирования сложных геосистем. Киев: Наукова думка, 1989. 159 с.
8. *Владимиров А.М., Ляхин Ю.И., Матвеев Л.Т., Орлов В.Г.* Охрана окружающей среды. Л.: ГМ, 1991. 423 с.
9. *Израэль Ю.А.* Экология и контроль состояния природной среды. М.: ГМ, 1984. 560 с.
10. *Израэль Ю.А., Цыбань А.В.* Антропогенная экология океана. Л.: ГМ, 1989. 528 с.
11. *Израэль Ю.А., Цыбань А.В., Вентцель М.В., Шигаев В.В.* Обобщенная модель ассимиляционной емкости морской экосистемы. ДАНСССР, 1988, Т. 298. С. 459–462.

Сведения об авторах:

Бортин Николай Николаевич, д-р геогр. наук, директор, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Дальневосточный филиал (ДальНИИВХ), Россия, 690014, г. Владивосток, а/я 153; e-mail: iwf@vlad.ru

Милаев Валерий Максимович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Дальневосточный филиал (ДальНИИВХ), Россия, 690014, г. Владивосток, а/я 153; e-mail: iwf@vlad.ru

Горчаков Анатолий Михайлович, канд. геогр. наук, заведующий отделом гидрологических исследований и водохозяйственных расчетов, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Дальневосточный филиал (ДальНИИВХ), Россия, 690014, г. Владивосток, а/я 153; iwf@vlad.ru