

Н.Н. Осадчая, Д.А. Клебанов

ОЦЕНКА ВЫНОСА БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ВОДОСБОРНОЙ ПЛОЩАДИ ДУНАЯ В СОВРЕМЕННЫЙ ПЕРИОД (1989-2012 ГГ.), ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ И ПУТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Выполнена количественная оценка поступления биогенных элементов с водосборной площади Дуная в Черное море за период 1989-2012 гг. путем расчета стока на основе фактических данных, а также с использованием полуэмпирической концептуальной модели MONERIS. Установлено наличие устойчивой зависимости между водным стоком реки и выносом азота и фосфора. Показано роль отдельных суббассейнов украинской части Дуная в формировании эмиссии исследуемых показателей. Оценена роль различных источников поступления биогенных элементов в украинской части бассейна Дуная и даны рекомендации по мерам для снижения их стока.

Ключевые слова: азот, фосфор, сток биогенных элементов, водность, антропогенное загрязнение, Дунай.

Введение

Биогенные элементы (соединения азота и фосфора), поступающие с водами Дуная, оказывают значительное влияние на экосистему Северо-Западной части Черного моря. В шельфовой зоне регулярно отмечается неконтролируемое повышение биопродуктивности, так называемое «цветение», последствием чего является возникновение гипоксии в придонном слое воды в теплый период года, снижение биоразнообразия и рыбных запасов. По данным [3] длительность явления гипоксии может насчитывать от 1 до 3 месяцев, а охват территории достигать 30 % акватории Северо-Западной части Черного моря.

Бассейн Дуная расположен на территории 19 стран, большинство из которых имеют высокий экономический уровень развития. Возрастание сбросов сточных вод и сельскохозяйственной освоенности территории, интенсификация растениеводства и животноводства неуклонно влечет за собой увеличение поступления биогенных элементов. Так, в конце 80-х гг. сток азота в устьевой зоне Дуная увеличился в 13 раз по сравнению с предыдущим десятилетием. В конце 90-х гг. это увеличение достигло уже 18 раз [5]. Вынос соединений фосфора был менее впечатляющим, однако также возрос в 2 и 10 раз соответственно за указанные отрезки времени.

В начале 90-х гг. кризис, охвативший экономику восточноевропейских стран, а также Украины, привел к снижению содержания биогенных элементов в воде придунайской части шельфа. В то же время состояние морской экосистемы не восстановилось, что отражается в сохранении придонной гипоксии, регулярно охватывающей 20-70 % морского шельфа [4, 9]. Концентрации соединений азота и фосфора в придунайском взморье до сих пор остаются наибольшими в Северо-Западной части Черного моря.

Стало очевидным, что для защиты Черного моря необходимо предпринимать системные действия по предотвращению загрязнения питающих его рек и, прежде всего, р. Дунай, обеспечивающей 60 % притока пресной воды. В 2002 г. Украина присоединилась к Конвенции по охране реки Дунай, объединившей усилия всех дунайских стран для снижения его загрязнения. Под эгидой исполнительного органа Конвенции, Международной Комиссии по Охране реки Дунай (МКОРД), совместными усилиями экспертов разных стран разрабатывается 6-ти летний План управления бассейном р. Дунай (далее План), включающий оценку основного прессинга на речную экосистему и предлагающий комплекс мер для его минимизации. Реализация I Плана (2009-2014 гг.) позволила снизить общую эмиссию в Черное море азота и фосфора на 12 % и

34 % соответственно. В 2015 г. завершена разработка II Плана, рассчитанного на период 2015-2020 гг. [19]. Сбалансированное управление точечными и диффузными сбросами, уменьшение уровня загрязнения биогенными и органическими веществами позволит избежать дальнейшего загрязнения Дуная и последующей эвтрофикации Черного моря.

Целью работы было проведение количественной оценки поступления соединений азота и фосфора с водосборной территории Дуная в современный период (1989-2012 гг.), а также выявление основных источников такого поступления на украинском участке.

Материалы и методы

Исходными материалами служили результаты наблюдений Дунайской гидрометеорологической обсерватории за период 1989-2012 гг. Использованы ежедневные данные о расходах воды Дуная, а также ежемесячных концентрациях минеральных форм азота и фосфора. Ввиду отсутствия наблюдений за органическими формами биогенных элементов, были привлечены данные транснациональной сети мониторинга (TNMN) МКОРД.

В качестве расчетного избран створ, расположенный на 168-й км от устья (г. Рени), ниже впадения последнего притока и выше разветвления дельты Дуная.

Расчетный метод базировался на применении уравнения, основанного на показателях водного стока и концентрации искомого компонента за сутки:

$$F = Q \times C \times 86,4,$$

где F – сток элемента в кг·сут.⁻¹, Q – расход воды, м³·с⁻¹, C – концентрация элемента, мг·л⁻¹, 86,4 – пересчетный коэффициент для перевода результата в кг·сут.⁻¹.

Ежедневные концентрации биогенных элементов определяли путем применения аппроксимирующей функции.

На основе разделения гидрографа выделяли генетически однородные гидрологические периоды: межень, половодье, паводок. Принимая во внимание паводковый режим реки, весенний паводок считался половодьем [6]. Результаты расчета ежедневного стока биогенных элементов интегрировали в пределах основных гидрологических фаз, а годовой сток получали путем их суммирования [8].

Для оценки цикличности колебаний исследованных компонентов были применены разностные интегральные кривые, построенные путем

суммирования отклонений модульных коэффициентов от среднего, приведенные к коэффициенту вариации [2]:

$$f(t) = \sum_i (K_i - 1) / C_v.$$

Для сравнения результатов графики многолетней динамики и разностные интегральные кривые построены в модульных коэффициентах (K) согласно:

$$K = A_i / \bar{A},$$

где A_i – значение i – элемента ряда; \bar{A} – среднее значение ряда.

Моделирование поступления биогенных элементов от диффузионных и точечных источников выполнено с применением модели MONERIS, разработанной в Институте пресноводной экологии и рыбоводства (Германия) и предоставленной Украине как стороне Дунайской конвенции. Это полуэмпирическая концептуальная модель, основанная на балансовом принципе и учитывающая основные пути поступления и расходования биогенных элементов в пределах водосбора [14-17, 20, 21].

Результаты и их обсуждение

Оценка общих показателей выноса биогенных элементов

Нижний участок Дуная обеспечивает формирование лишь ~8 % общего стока реки, однако здесь интегрируется влияние разнонаправленных естественных процессов и антропогенного загрязнения ее верхнего и среднего течения [7]. Как показано в [13], самое большое содержание азота в аммонийной и нитритной форме характерно именно для нижнего участка Дуная.

Целесообразно отметить, что полученные результаты существенно превысили соответствующие показатели стока биогенных элементов Дуная в 1950-1960 гг. [1, 10]. Для азота это превышение составило 2,3 раза, для фосфора – 2,7 раза (табл. 1).

Закономерности многолетней динамики выноса соединений азота и фосфора

За исследуемый период прослеживается общая тенденция к снижению выноса $N_{\text{общ}}$ и $P_{\text{общ}}$ (рис. 1).

Исследуемый временной отрезок может быть разделен на 2 основных периода, в течение которых доминировали различные факторы, обуславливающие вынос биогенных элементов.

Первый период приурочен к началу 90-х гг., в это время еще достаточно эффективно работала

экономика как в Украине, так и в восточноевропейских странах, что предполагает значительное антропогенное воздействие на водные объекты. Действительно, показатели стока азота и фосфора в начале 90-х гг. достигли максимальных значений.

Таблица 1
Ежегодный вынос биогенных элементов с водами р. Дунай за период 1989-2012 гг., створ г. Рени

Год	N _{общ.} , тыс. т	P _{общ.} , тыс. т	W, км ³
1989	503,4	84,2	176,4
1990	1508,2	68,1	132,4
1991	1451,7	98,5	198,0
1992	369,2	88,4	172,2
1993	214,7	67,9	153,6
1994	247,8	110,3	180,5
1995	723,8	62,1	209,6
1996	649,5	75,0	235,7
1997	486,5	43,5	224,4
1998	565,9	27,1	221,3
1999	753,7	56,4	262,6
2000	617,3	40,4	215,5
2001	510,0	33,0	205,0
2002	572,5	44,0	217,0
2003	331,6	33,8	158,2
2004	491,1	36,0	209,7
2005	731,0	58,8	269,8
2006	698,4	42,1	260,0
2007	479,9	24,0	176,5
2008	450,5	24,6	188,4
2009	470,9	28,2	204,1
2010	612,1	40,4	299,5
2011	457,5	18,5	169,0
2012	469,4	16,0	167,0
Среднее	598,6	50,9	204,4

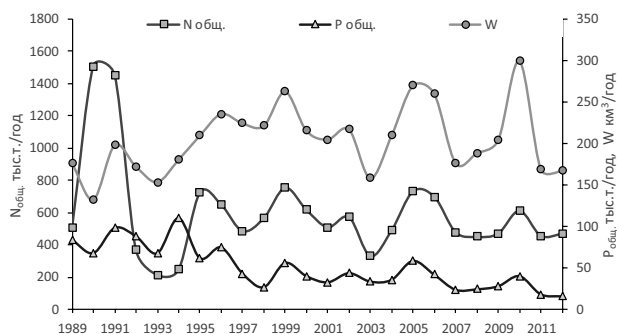


Рис. 1. Динамика изменения водного стока и выноса N_{общ.} и P_{общ.} с водами р. Дунай за период 1989-2012 гг., г. Рени

Во второй период, наблюдаемый со середины 90-х гг. до настоящего времени, колебания стока биогенных элементов синхронны изменениям

водности. За период 1992-2012 гг. коэффициент корреляции между стоком азота и водностью составил $r = 0,80$. Для фосфора аналогичный показатель был равен $r = 0,76$ за период 1997-2012 гг. Значимость коэффициентов корреляции устанавливали на основании распределения Стьюдента, $p = 0,05$; при $r > 0,57$.

Для проявления роли водности в переносе исследуемых компонентов применили известный метод разностных интегральных кривых. Подъем кривой вверх свидетельствует о начале фазы увеличения исследуемого показателя, наклон вниз – о фазе уменьшения (рис. 2).

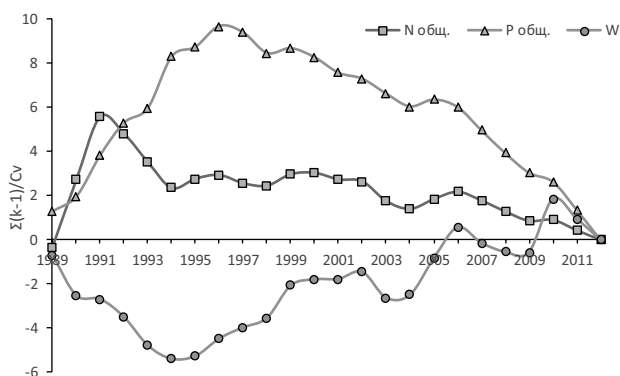


Рис. 2. Разностные интегральные кривые колебаний водного стока (W) и выноса биогенных элементов (N_{общ.} и P_{общ.}) в воде р. Дунай за период 1989-2012 гг., створ г. Рени

Известно [6], что для Дуная периодичность многолетней цикличности водного стока составляет 25-35 лет. За исследуемый период полного цикла водности выделить не удалось. С 1989 г. по 1994 г. наблюдалась маловодная фаза водности, когда средний расход воды составлял 5537 м³/с (рис. 2). Начиная с 1995 года, она сменилась на многоводную фазу, которая длится до настоящего времени. Средний расход воды в этот период возрос до 5890 м³/с.

Колебания стока биогенных элементов изменяются асинхронно относительно водности реки (рис. 2).

В период 1995-2005 гг. на фоне возрастания водности смыв соединений азота устойчиво уменьшался. Начиная с 2006 г. этот процесс существенно интенсифицировался. Можно предположить, что наряду с увеличением водности, дали эффект меры, предпринимаемые многими дунайскими странами, а именно: строительство очистных сооружений, углубление степени очистки сточных вод, регулирование использования удобрений [7].

Величина стока P_{общ.} устойчиво уменьшается с

1995 г. Минимальные его значения, как и для азота, характерны для настоящего времени (рис. 2). Содержание растворимых фосфорсодержащих соединений в подстилающей поверхности чрезвычайно мало и рост выноса соединений фосфора, главным образом, связан с поступлением сточных вод, в которые они попадают с моющими средствами. Эффективность углубленной очистки сточных вод от фосфора составляет 50 %, а для распространенной в Украине биологической очистки – не превышает 20 %. Следствием этого стало ограничение, а в отдельных странах и полный запрет использования фосфорсодержащих моющих средств. Недавно вопрос по решению указанной экологической проблемы был поднят и в Украине, что привело к подготовке законодательной нормы относительно постепенного ограничения использования фосфора в моющих средствах вплоть до полного его запрета.

График хронологических колебаний модульных коэффициентов (k) исследуемых показателей показал, что с началом периода многоводной фазы синхронность колебаний водного стока и выноса биогенных элементов полностью совпадает (рис. 3). Это дало нам основание сделать вывод о ведущей роли природных процессов в формировании стока биогенных элементов.

Наряду с многолетними колебаниями, внутригодовое распределение стока биогенных элементов также носит неравномерный характер и зависит от водности. Практически половина растворенных биогенных элементов выносятся водами Дуная в весеннее половодье ($N_{\text{общ.}}$ – 48 %, $P_{\text{общ.}}$ – 43 %), на долю паводков соответственно приходится 32 % и 38 %; на межень – 17-20 %.

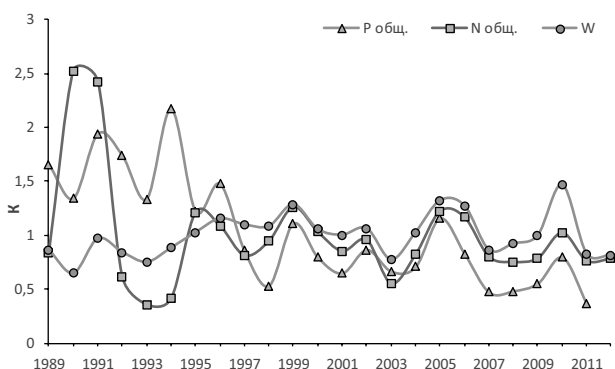


Рис. 3. Хронологический график колебаний модульных коэффициентов (k) водного стока и стока биогенных элементов в нижней части бассейна р. Дунай, г. Рени

Моделирование эмиссии биогенных элементов и оценка роли отдельных источников их поступления

Наряду с прямым расчетом для оценки стока биогенных элементов была задействована модель MONERIS, позволяющая оценить поступление исследуемых элементов от различных источников [14-17, 20, 21].

Согласно результатам моделирования, выполненным авторами в составе международной группы экспертов, за период 2009-2012 гг. с водами Дуная в Черное море ежегодно поступало в среднем 653,4 тыс. т $N_{\text{общ.}}$ и 38,5 тыс. т $P_{\text{общ.}}$ [6, 19]. Полученные данные превышают показатели фактического стока на 23,2 % для $N_{\text{общ.}}$ и 32,9 % для $P_{\text{общ.}}$. Эта разница, на наш взгляд, обусловлена тем, что использованная модель учитывает поступление за счет эрозии, а расчет фактического выноса сделан только для растворенной части.

Как видно, превышение по фосфору больше по сравнению с азотом, особенно значительно эта разница возрастает в маловодные годы. По всей вероятности, играет роль геохимическое поведение указанных элементов в окружающей среде. Азот относится к легкорастворимым компонентам и мигрирует преимущественно в растворимой форме, тогда как фосфор более склонен к сорбции на мелкодисперсных минеральных частицах почвы и в речном потоке Дуная находится в виде взвеси. Только за счет замедления скорости реки в водохранилище Железные Ворота около 20 % потока фосфора оседает за счет аккумуляции [7].

В целом, полученные данные подтверждают факт приемлемости использования указанной модели для оценки нагрузки биогенных элементов (рис. 4).

Подобно стоку азота и фосфора, полученному по фактическим данным, результаты модельных расчетов также тесно коррелируют с водностью реки. Это свидетельствует в поддержку того, что роль точечных источников в настоящий период снизилась, а преобладающее влияние на поступление биогенных элементов приобрел смыв с поверхности водосбора.

В последнее десятилетие наблюдается тенденция постепенного уменьшения как количества использованной свежей воды, так и отведенных (обратных) вод. Причиной служит перераспределение отраслей экономики в результате экономического кризиса, а также проведение странами ЕС, расположенными в верхней и средней частях Дуная, модернизации систем очистки сточных вод [7]. Например, в 2005 г. к очистным сооруже-

ниям был подключен последний город Венгрии, не имевший их ранее.

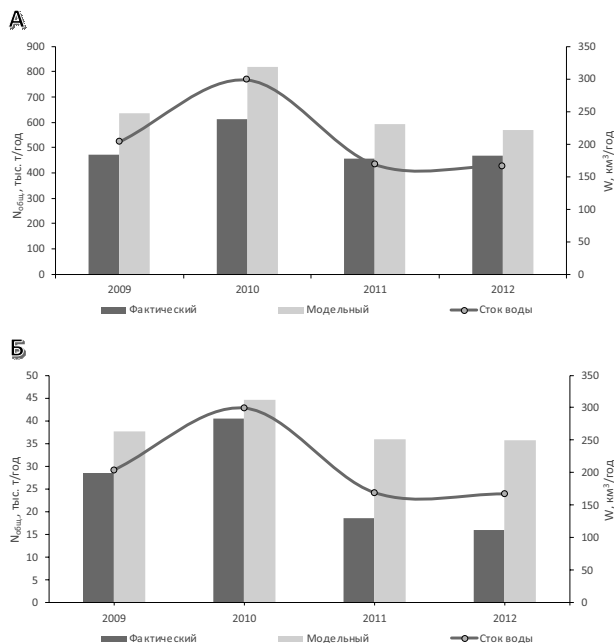


Рис. 4. Показатели фактического и смоделированного выноса биогенных элементов (А – азота и Б – фосфора), а также стока воды (W) в нижней части бассейна р. Дунай за 2009-2012 гг., створ г. Рени

За последние 10 лет на украинской части бассейна Дуная также наблюдается существенное уменьшение забора и использования воды в промышленности, сельском хозяйстве и коммунальном секторе [12]. С 2005 г. сбросы загрязненных сточных вод в бассейне р. Тиса уменьшились на 80 %, р. Прут – 73 %, нижней части р. Дунай – 47 % (рис. 5).

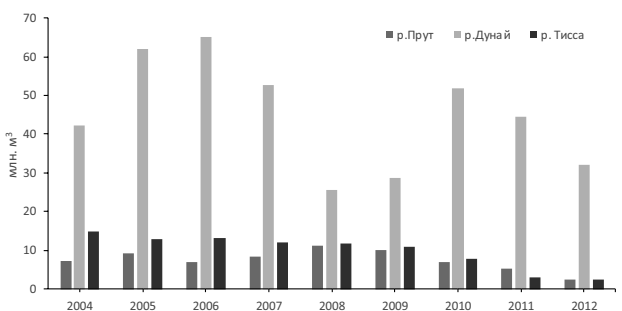


Рис. 5. Годовая динамика сбросов загрязненных сточных вод в отдельные водосборы нижнего Дуная на территории Украины, 2004-2012 гг.

Очистка сточных вод – одна из слабых и недостаточно технически оснащенных технологических стадий цикла водопользования в Украине [12, 18]. До настоящего времени более 60 % сточных вод сбрасываются без очистки, 10 % – имеют

только первичную очистку и 30 % очищаются с применением биологических методов, позволяющих эффективно избавляться от загрязняющих веществ.

Согласно государственной отчетности Украины [12] в реки бассейна Дуная в 2012 г. было сброшено 142,0 млн. м³ сточных вод, из которых нормативно чистых – 56,1 млн. м³ и нормативно (условно) чистых без очистки 49,6 млн. м³, загрязненных вод – 36,3 млн. м³. Общий канализационный сток, сброшенный в бассейне Дуная на территории Украины, распределяется по отраслям экономики так: коммунальное хозяйство – 79,5 млн. м³, промышленность – 26,1 млн. м³, сельское хозяйство – 30,9 млн. м³, другие водопользователи – 5,5 млн. м³.

Распределение сброса сточных вод по отраслям экономики и территориально-административным единицам Украины за 2012 г. представлено в табл. 2.

Таблица 2

Отведение сточных вод по отраслям экономики и территориально-административным единицам Украины в 2012 г.

Бассейн, область	Сброшено сточных вод	Сельское хозяйство	Жилищно-коммунальное хозяйство	Промышленность	Другие
	млн. м³	%			
Нижний Дунай, Одесская обл.	53,0	34,3	57,9	3,1	4,7
р. Тиса, Закарпатская обл.	32,7	0,6	98,3	0,4	0,7
р. Прут, Черновицкая обл.	42,5	25,7	21,0	45,2	8,1
р. Прут, Ивано-Франковская обл.	13,8	26,4	48,7	24,8	0,1
ИТОГО	142,0	21,8	56,5	18,4	3,4

* таблица сформирована по данным [12]

Как видно из результатов табл. 2, доминирующее значение в загрязнении поверхностных вод Дуная от точечных источников имеют коммунально-бытовые сточные воды.

Роль отдельных суббассейнов Украины в формировании стока биогенных элементов нижнего Дуная

Согласно результатам моделирования с украинского участка бассейна Дуная поступа-

ет в среднем 17 тыс. т/год соединений азота и 1,2 тыс. т/год соединений фосфора [19]. В относительных единицах это составляет 2,5 % и 2,9 % соответственно от общей величины выноса указанных элементов в Черное море (табл. 3).

Таблица 3

Средний вынос соединений азота и фосфора с украинского участка бассейна Дуная, 2009-2012 гг.

Суббассейн	Поступление, т/год		Доля от украинского участка в целом, %	
	N _{общ.}	P _{общ.}	N _{общ.}	P _{общ.}
Нижний Дунай	2792,7	127,0	16,5	10,8
р. Прут	5984,9	572,5	35,4	48,6
р. Тиса	8144,1	478,8	48,1	40,6
Всего	16921,7	1178,3	100	100

Полученные результаты показали, что наименьший вклад в загрязнение Дуная вносит нижний Дунай, а именно 16,5 % по N_{общ.} и 10,8% P_{общ.}.

Доминирующая роль в выносе соединений азота принадлежит суббассейну Тисы, на территории которого формируется более 48 % от потока N_{общ.} с украинской территории. Бассейн Прута ответственен за привнесение 48,6 % соединений фосфора.

За последние 20 лет уровень загрязнения водных объектов, несмотря на значительное снижение выноса соединений азота и фосфора с территории Украины, остается весьма значительным (табл. 1). Так, вынос азота с территории бассейнов Тисы и Прута превышает природное поступление в 9-10 раз, на нижнем Дунае – в 6,8 раз. Общий вынос фосфора с территории бассейна Тисы в 5 раз больше природного фона, а на нижнем Дунае и в бассейне Прута – превышение составляет 7 и 11 раз соответственно (табл. 4).

Для оценки степени антропогенной нагрузки применили также соответствующий классификатор, основанный на квотировании модулей вы-

носа биогенных элементов [11]. Согласно этому подходу антропогенная нагрузка делится на 6 уровней. Полученные результаты показали, что экосистема нижнего Дуная находится под влиянием умеренной антропогенной нагрузки, соответствующей второму уровню.

Основные источники поступления соединений азота и фосфора в речную сеть украинской части бассейна Дуная

Для разработки комплексных мер по снижению уровня антропогенного влияния весьма важной информацией являются сведения об основных источниках поступления соединений азота и фосфора. Как видно из табл. 4, доминирующая часть азота привносится за счет сельского хозяйства. Украина относится к странам со значительной долей сельскохозяйственного производства. Для обеспечения высокой урожайности активно применяются азотные и фосфорные удобрения. Первые относятся к хорошо растворимым соединениям и легко вымываются водными потоками. Количество применяемых удобрений эффективно регулируется их стоимостью, а разработка технологических регламентов и способов внесения азотных удобрений, устройство прибрежных заградительных полос позволяют существенно сократить их попадание в речную сеть.

Соединения фосфора преимущественно поступают от населенных пунктов (54,2 %), что обусловлено сбросом сточных вод предприятий жилищно-коммунального хозяйства (см. табл. 2).

Для верификации количественных показателей давления на водные экосистемы от городских агломераций на примере 2012 г. был произведен параллельный расчёт поступления биогенных элементов с использованием данных о численности населения, наличия очистных сооружений и глубины очистки сточных вод. Согласно полученным результатам за счет коммунально-бытовых вод в речную сеть поступило 2,4 тыс. т/год N_{общ.}

Таблица 4

Поступление биогенных элементов от различных источников на украинском участке бассейна Дуная, 2009-2012 гг.

Источники эмиссии	N _{общ.} т/год			%	P _{общ.} т/год			%
	р. Дунай	р. Прут	р. Тиса		р. Дунай	р. Прут	р. Тиса	
Населенные пункты	185,7	1340,6	1082,8	15,5	10,9	348,3	279,1	54,2
Сельское хозяйство	1878,1	2874,1	2111,8	40,8	94,0	143,4	42,7	23,8
Другие источники	309,6	1161,9	4006,4	32,5	4,5	29,4	64,0	8,3
Природный фон	410,1	583,1	889,6	11,2	17,7	51,3	93,0	13,8
Суммарная эмиссия	2783,5	5959,7	8090,6	100,0	127,0	572,5	478,8	100,0

и 0,74 тыс. т/год $P_{\text{общ}}$. По данным моделирования за счет населенных пунктов привносится 2,6 тыс. т/год $N_{\text{общ}}$ и 0,64 тыс. т/год $P_{\text{общ}}$, т.е. получено хорошее соответствие в оценках, основанных на принципиально различных подходах. Согласно результатам двух методик, наибольшую нагрузку на водные объекты вносят населенные пункты суббассейнов р. Тиса и р. Прут.

Исходя из полученных материалов, для снижения загрязнения поверхностных вод фосфором необходима реализация комплекса мер в жилищно-коммунальном хозяйстве.

Строительство или реконструкция очистных сооружений являются весьма дорогостоящей мерой. В целевых государственных Программах «Питьевая вода Украины», а также «Развитие водного хозяйства и оздоровление водных ресурсов Украины» эти вопросы регулярно поднимаются, однако на практике редко реализуются в надлежащем объеме, т.е. уже в течение длительного времени проблема не решается, а консервируется. Хотелось бы подчеркнуть, что в настоящее время, когда ВВП Украины до сих пор не достиг уровня 1990 г., имеется в среднем десятикратное превышение выноса соединений азота и фосфора над их природным фоном. При сохранении имеющегося положения рост экономики неотвратимо приведет к резкому возрастанию эвтрофикации речных систем с последующим загрязнением шельфа Черного моря.

Выводы

За исследуемый период с водами Дуная в Черное море в среднем поступало 599 тыс. т/год $N_{\text{общ}}$ и 51 тыс. т/год $P_{\text{общ}}$.

В многолетнем аспекте прослеживается общая тенденция к снижению выноса $N_{\text{общ}}$ и $P_{\text{общ}}$. Высокие показатели выноса азота и фосфора в начале 90-х годов XX ст. связаны с активной экономической деятельностью восточноевропейских стран и Украины. Со середины 90-х годов вследствие экономического кризиса величина стока биогенных элементов значительно уменьшилась. Несмотря на это, в настоящее время сток биогенных элементов в 7-11 раз превышает фоновые показатели.

В нижней части Дуная отмечается стойкая зависимость выноса биогенных элементов относительно изменений водного стока. Начиная с 1995 г., на фоне возрастания водности смыв соединений азота и фосфора устойчиво уменьшается. Коэффициент корреляции между стоком азота и водностью в створе г. Рени составил 0,80, для фосфора аналогичный показатель был равен $r = 0,76$.

С началом периода многоводной фазы в бассейне Дуная наблюдается синхронность колебаний водного стока и выноса биогенных элементов, на основании чего сделан вывод о ведущей роли природных процессов в формировании стока биогенных элементов.

Результаты моделирования выноса биогенных элементов за период 2009-2012 гг. показали, что доминирующая часть азота привносится за счет сельского хозяйства, фосфора – за счет влияния коммунально-бытовых вод.

Получены данные относительно роли отдельных суббассейнов (нижний участок Дуная, реки Тиса и Прут) в формировании биогенной нагрузки на экосистему Дуная с территории Украины. За счет суббассейна Тисы поступает более 48 % стока $N_{\text{общ}}$, тогда как фосфор преимущественно смывается с водосборной площади Прута (более 48 % от стока $P_{\text{общ}}$). Роль участка нижнего Дуная минимальна. Его вклад в вынос азота с территории Украины составляет 17 тыс. т/год (2,5 %), вынос фосфора – 1,2 тыс. т/год (2,9 %).

Полученные результаты являются основанием для разработки мер по оздоровлению водных ресурсов украинской части бассейна Дуная.

Для снижения поступления соединений азота и фосфора от точечных источников предлагается:

1. Увеличить степень подключения населенных пунктов к системам канализации, которая до сих пор в Украине остается одной из наименьших в дунайском регионе.

2. Усилить степень очистки сточных вод городских агломераций. Преимущественная часть населенных пунктов в Украине оснащена очистными сооружениями биологического типа, которые потенциально могут удалять до 35 % соединений азота и 20 % – фосфора. Достаточно высока доля населенных пунктов с физической очисткой, которая удаляет лишь 9 % азота и 10 % фосфора. До сих пор существуют населенные пункты, где сточные воды отводятся без какой-либо очистки.

Снижение поступления азота и фосфора от распределенных источников менее затратно, но потребует разработки ряда регламентирующих норм, прежде всего, по применению удобрений в сельскохозяйственной практике. Важным фактором для перехвата стока биогенных соединений является обустройство прибрежных заградительных полос, препятствующих попаданию биогенных элементов в речную сеть.

Авторы приносят свою глубокую благодарность д-ру А. Герике (Институт пресноводной

экологии и рыбоводства, Германия) за консультаций и оказанную помощь при моделировании.

* *

1. *Алмазов А.М.* Гидрохимия устьевых областей рек (Северное Причерноморье). Ч. 1, гл. 1 / *Алмазов А.М.* – К.: Наук. думка, 1962. – С. 10-280.
2. *Андреянов В.Г.* Циклические колебания годового стока и их учет при гидрологических расчетах / *Андреянов В.Г.* // Тр. ГГИ. – Л.: Гидрометеиздат, 1959. – Вып. 68. – С. 3-49.
3. *Берлинский Н.А.* Динамика техногенного воздействия на природные комплексы устьевой области Дуная / *Берлинский Н.А.* – О.: Астропринт, 2012. – С. 9-77. (Одесский гос. экологический ун-т).
4. *Берлинский Н.А.* Придонная гипоксия на северных шельфах Черного и Каспийских морей как фактор эвтрофирования / *Н.А. Берлинский, А.Н. Косарев, А.В. Кураев, Ю.И. Богатова* // 4-я конф. Динамика и термика водохранилищ и прибрежной зоны морей: тез. докл. – М., 2004. – С. 196-199.
5. *Берлинский Н.А.* Естественные и антропогенные источники Черного моря. Эвтрофикация. / *Берлинский Н.А., Богатова Ю., Гаркавая Г.П.* – О.: Одесский ин-т отделения биологии южных морей, 2001. – 16 с.
6. Гидрология дельты Дуная / Под ред. *Михайлова В.Н.* – М.: Изд-во ПК ГЕОС, 2004 – С. 59-130.
7. Екологічна програма дій для басейну Дунаю. Стратегічний план дій. Ч. 3. Проблеми і пріоритети // International Commission for the Protection of the Danube River. [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. – Режим доступу: www.icpdr.org www.menr.gov.ua/dovkil, (дата звернення 20.03.2012) – Назва з екрана.
8. *Закревский Д.В.* Сток химических компонентов рек Украинской ССР / *Закревский Д.В., Пелешенко В.И., Хильчевский В.К.* // Водные ресурсы – М.: Наука, 1988. – Т.15, №6. – С. 63-73.
9. *Клебанов Д.О.* Оцінка вносу хімічних елементів водами Дунаю в сучасний період / *Клебанов Д.О., Осадчая Н.М., Осадчий В.І.* // Наук. пр. УкрНДГМІ – К.: Ніка-Центр, 2003. – Вип. 251. – С. 119-134.
10. *Никаноров А.М.* Многолетние тенденции общего и антропогенного выноса органических и биогенных веществ реками России в Балтийское, Черное, Азовское, Каспийское моря и озеро Байкал / *Никаноров А.М., Смирнов М.П., Клименко О.А.* // Водные ресурсы. – М.: Наука, 2010. – Т. 37, № 2 – С. 209-217.
11. *Никаноров А.М.* Антропогенная трансформация компонентного состава водной среды устьевой области р. Лены / *Никаноров А.М., Брызгалов В.А., Костенко Л.С* [и др.] // Водные ресурсы. – М.: Планета, 2011. – Т. 38, №2. – С. 181-192.
12. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища. Мінприроди [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. – Режим доступу: www.menr.gov.ua/dovkil.
13. *Чернявская А.П.* Химический состав воды Дуная / *Чернявская А.П., Денисова А.И* [и др.] // Водные ресурсы. – М.: Наука, 1993. – Т. 20, №4. – С. 440-446.
14. *Behrendt H., Opitz D.* Retention of nutrients in river systems: dependence on specific runoff and hydraulic load / *H. Behrendt, D. Opitz* // *Hydrobiologia.* – 1999. – N 410. – P. 111-122.
15. *Behrendt H.* Inventories of point and diffuse sources and estimated nutrient loads - A comparison for different river basins in Central Europe / *H. Behrendt* // *Wat. Sci. Technol.*, 1996. – N 33. – P. 99-107.
16. *Behrendt H.* Nutrients and heavy metals in the Odra River system / *H. Behrendt, R. Dannowski* – Berlin : Weissensee Verlag Publ., 2005. – 337 p.
17. *Behrendt H.* Estimation of the nutrient input into River system – experiences from German rivers / *H. Behrendt, M. Korbmilch, D. Opitz, O. Schmoll and G. Scholz* // *Regional Environmental Changes* – 2002. – N 3. – P. 107-117.
18. Joint Danube Survey 2. Final Scientific Report. Results of the ICPDR Municipal Emission Inventory 2006 and 2007 [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. – Режим доступу: www.icpdr.org/jds.
19. Management Plans for the Danube River Basin published 2015 [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. – Режим доступу: www.icpdr.org/main/management-plans-danube-river-basin-published.
20. *Venohr M., Behrendt H.* Modeling the dependency of riverine nitrogen retention on hydrological conditions and temperature: Proceedings 6th Internat. Conf. On Diffuse Pollution Amsterdam, 30.09-04.10.2002, – P. 573-574.
21. *Venohr M.* Modelling of Nutrient Emissions in River Systems – MONERIS – Methods and Background / *M. Venohr, U. Hirt, J. Hofmann, Opitz D.* at all // International Review of Hydrobiology – 2011 – 96 (5) – P. 435-483.

Український гідрометеорологічний інститут, Київ

Н.М. Осадчая, Д.О. Клебанов

Оцінка вносу біогенних елементів з водозбірної площі Дунаю в сучасний період (1989-2012 рр.), основні чинники його формування та шляхи регулювання

Виконано кількісну оцінку надходження біогенних елементів із водозбірної площі Дунаю в Чорне море за період 1989-2012 рр. шляхом розрахунку стоку на основі фактичних даних, а також з використанням напівемпіричної концептуальної моделі MONERIS. Установлено наявність стійкої залежності між водним стоком річки і виносом азоту та фосфору. Показано роль окремих суббасейнів української ділянки Дунаю у формуванні емісії азоту та фосфору. Оцінено роль різних джерел надходження біогенних елементів на українській ділянці басейну Дунаю. Надано рекомендації щодо заходів для зменшення стоку біогенних елементів.

Ключові слова: азот, фосфор, стік біогенних елементів, водність, антропогенне забруднення, Дунай.

N.M. Osadcha, D.O. Klebanov

Assessment biogenic elements flux from the catchment area of the Danube in the modern period (1989-2012). The main factors of its formation and ways of regulating

The quantitative estimation of nutrients emission from Danube catchment area to the Black sea was carried out for the period 1989-2012. Direct calculation based on the actual data and model approach using conceptual model MONERIS have

been used. The presence of a stable dependence between water flow and nitrogen and phosphorus loads was found. The role of the individual sub-basins within Ukrainian part of Danube basin concerning nitrogen and phosphorus emissions is shown. Recommendations on measures for mitigation of nutrients load are provided.

Keywords: nitrogen, phosphorus, nutrients discharge, water content, anthropogenic pollution, Danube.

УДК 556. 551. 3/.4; +556. 561. 3/.4; 628.1.03

В.В. Осипов, Н.Н. Осадчая

**ВЫБОР ИМИТАЦИОННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ
ДЛЯ АНАЛИЗА ВЫНОСА СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА
И ФОСФОРА И ЕЕ АПРОБАЦИЯ
НА МАЛОМ РЕЧНОМ ВОДОСБОРЕ**

Выполнен обзор существующих моделей поступления и транспорта биогенных элементов с территории водосбора, а также проведена оценка опыта их применения в различных странах. Для использования в Украине предложена модель SWAT (Soil and Water Assessment Tool), являющаяся наиболее оптимальной для экономических, физико-географических условий страны, а также с точки зрения возможностей информационного обеспечения. Проведена апробация предложенной модели на малом водосборе р. Головесня. Представлены результаты калибровки модели SWAT для показателя водного стока.

Ключевые слова: эвтрофикация, азот, фосфор, моделирование, диффузионные источники, SWAT.

Вступление

Активное использование водных ресурсов в процессе функционирования человеческого общества приводит к ряду негативных экологических последствий, среди которых важную роль играет нарушение баланса организмов водной экосистемы за счет массового развития водорослей и высших водных растений, хорошо известное под термином эвтрофикация. Это явление приводит к ухудшению физических, физико-химических и органолептических свойств воды и ограничивает ее дальнейшее использование. Известно, что переход водных объектов в эвтрофное состояние может быть вызван как естественными, так и техногенными процессами, среди которых по скорости, интенсивности и пространственному охвату, безусловно, доминирующая роль принадлежит антропогенному фактору.

На начальном этапе борьба с повышенной продуктивностью водных объектов в основном

была направлена на следствие. Биомассу водорослей физически собирали и извлекали из водного объекта, либо обрабатывали пятна цветения химическими реагентами (медным купоросом, отдельными видами пестицидов, коагулянтами) с целью сдержать их развитие. Практическая реализация указанных мер показали их недостаточную эффективность и со временем основные усилия по борьбе с эвтрофикацией сосредоточились на предупреждении ее возникновения. Главной задачей было предотвратить возрастание или снизить поступление в водные объекты элементов, являющихся пусковым механизмом массового развития водорослей, а именно, соединений азота и фосфора. В англоязычной литературе эти элементы относятся к группе nutrients, т.е. кормных элементов, что прямо отражает их роль в водных экосистемах.

К основным факторам, обуславливающим поступление отмеченных биогенных элементов, относятся сброс сточных вод коммунальных,