

Р.Я.Миньковская, Ю.П.Ильин

*Морское отделение Украинского научно-исследовательского
гидрометеорологического института, г.Севастополь*

ВЫНОС РАСТВОРЕННЫХ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В ЧЕРНОЕ МОРЕ СО СТОКОМ КИЛИЙСКОГО РУКАВА Р.ДУНАЙ

На основе анализа данных многолетних наблюдений (с 1976 по 2003 гг.) обоснован способ расчёта выноса биогенных веществ Килийским рукавом Дуная и выполнено уточнение его значений за многолетний период. Для расчёта расхода биогенных веществ в различные сезоны года получены статистические зависимости, позволяющие по данным наблюдений в вершине Килийской дельты (Вилково) рассчитывать поступление биогенных веществ в море по Килийскому рукаву Дуная.

В последние годы развернуты международные исследования в рамках Черноморской экологической программы, в которых приоритетную роль играет изучение процесса эвтрофирования моря и нахождение его причин. Для детального исследования поступления биогенных веществ (БВ) в море из устьевых областей рек с ноября 2003 по октябрь 2004 гг. выполнены учащенные синхронные определения и измерения составляющих выноса БВ крупными реками в пунктах отбора проб и гидрометрических створах, расположенных на границах (или вблизи) раздела река – устьевое взморье или лиман – море [1]. В связи с этим, возникли некоторые методические проблемы, обусловленные необходимостью согласования требуемой еженедельной дискретности и места отбора проб с ограниченными финансовыми возможностями и сопоставления полученных результатов с предшествующими многолетними данными.

Решение указанных проблем представляется особенно важным для Килийского рукава р.Дунай, т.к. он является наиболее многоводным, главным рукавом дельты, по нему поступает 52 – 73 % стока Дуная, что определяет его существенное влияние на устьевое взморье и прилегающую часть моря. Килийский рукав ниже Вилково, в 20 км от взморья, образует внешнюю (морскую) Килийскую дельту со сложной системой многочисленных разветвленных рукавов. Проведение учащенных синхронных измерений в устьях всех рукавов с целью определения суммарного стока БВ из дельты в море практически невозможно при существующих ограничениях в финансовых и технических ресурсах.

Таким образом, целью данной работы было уточнение оценок выноса БВ со стоком Килийского рукава. При этом основное внимание уделялось обоснованию корректности оценки стока БВ в море по данным многолетних наблюдений в вершине Килийской дельты (Вилково) и более короткорядным наблюдениям в устьях дельтовых водотоков.

В настоящее время нет однозначного мнения о том, как правильно рассчитывать вынос веществ в море речным стоком. Например, в руководстве [2] за расчётный створ рекомендуется принимать замыкающий створ, нахо-

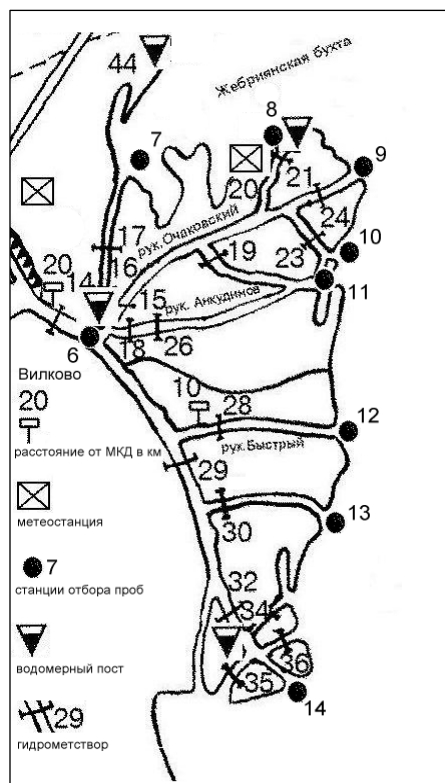
дящийся выше возможного влияния моря. Если следовать данным рекомендациям, замыкающим (расчётным) створом должен быть створ выше г.Рени, расположенный ниже впадения р.Прут на расстоянии 170 км от моря. Естественно, что на участке от этого створа до моря могут быть любые изменения как водной, так и гидрохимической составляющей выноса веществ. По данным [3], в устьевой области Дуная концентрация растворенных в воде веществ по направлению к устьям рукавов значительно изменяется: «в устьевой области теряется около 96 % их массы». В этой же работе рекомендуется рассчитывать вынос веществ в море по наблюдениям в устьях рукавов, поскольку, по мнению автора, расчёт выноса веществ без учёта водности рукавов приводит к ошибке расчёта до 130 %. Авторы [4] полагают, что в дельте аккумулируется от 39 до 78 % растворенных веществ. В [5] подробно рассматриваются методические аспекты проблемы. В частности, показано, что результаты расчета выноса вещества зависят от выбора пунктов наблюдений, периодов осреднения данных и используемых математических процедур расчета выноса по концентрации вещества и стоку воды.

Вынос БВ со стоком р.Дунай рассматривался в различных работах (например, [6 – 8]), зачастую без указаний створов, по которым принимался расход воды, определялась концентрация и рассчитывался сток БВ. Не выполнялся анализ изменений выноса БВ между расчетным створом и морским краем дельты. В основном, рассчитывался вынос веществ из р.Дунай в море по среднему за месяц или год расходу воды в створе Рени, принимаемом за вершину дельты Дуная, и концентрации веществ в Рени, Измаиле, Вилково или в устьях рукавов Килийской дельты, осредненной также за месяц или год. При этом, если определение концентрации выполнялось раз в месяц (что довольно типично), её значение принималось за среднюю месячную величину, что, очевидно, не соответствует действительности. Такой подход давал весьма приближенную оценку поступления химических веществ в Черное море со стоком р.Дунай в целом. Он не учитывал изменение концентрации веществ во времени, на устьевом участке реки и в водотоках дельты, а также то, что при различном стоке воды в вершине дельты Дуная (Рени) в вершину Килийской дельты (Вилково) поступает различный объем воды из-за особенностей распределения стока в дельте р.Дунай.

Материалы и методика исследований. В работе использованы ежегодные данные Государственного Водного Кадастра, а также материалы экспедиционных наблюдений Дунайской ГМО с 1976 по 2003 гг. [9 – 12], всего около 11 тыс. определений концентрации растворенных форм биогенных веществ: азота, фосфора и кремния. Ряды наблюдений за концентрацией БВ неодинаковые: использованы данные о содержании азота с 1976 г., фосфора и кремния – с 1980 г. В этот период экспедиционные наблюдения (съёмки) производились, в основном, ежемесячно.

Рассматриваемый район Килийской дельты представлен на рис.1, где показаны станции и створы наблюдений.

На основе квазисинхронных гидролого-гидрохимических съёмок в Килийской дельте Дуная (т.е. комплекса ограниченных по времени натуральных наблюдений и отбора проб в вершине и рукавах) выполнен расчет поступления БВ в район Вилково (вершину Килийской дельты) и в море. Проана-



Р и с . 1 . Схема района исследований.

Расход воды в сроки определения концентрации принимался по данным ежегодников [12]: в Вилково – за сутки, в которые выполнялся отбор проб воды для определения концентрации веществ, в устьях рукавов – с учетом времени добегаания, которое в среднем составляет одни сутки.

Так как составляющими выноса биогенных веществ в море является их концентрация и расход воды, рассмотрены закономерности изменения этих составляющих в Килийской дельте Дуная. Рассчитывалось поступление в море растворенных форм аммонийного ($N-NH_4$), нитритного ($N-NO_2$) и нитратного ($N-NO_3$) азота, суммы указанных элементов (т.е. растворенный неорганический азот – DIN), фосфатного ($P-PO_4$) и общего (TP) фосфора, а также силикатов (SiO_3).

Изменчивость расхода воды. С 1976 по 2003 гг., во время выполнения квазисинхронных съёмок, расход воды в Вилково изменялся в пределах 1600 – 7800 м³/с (80 % многолетнего размаха), средний расход воды был близок к среднему многолетнему значению (3860 м³/с) и составил 4020 м³/с, среднее квадратическое отклонение расхода воды 1540 м³/с (КВ = 38 %). Значимых тенденций в изменениях расхода воды не обнаружено. Максимум расхода воды в Вилково в среднем отмечался в мае, минимум – в октябре.

Средний расход воды в период выполнения квазисинхронных съёмок (1976 – 2003 гг.) в рукавах Килийской дельты составил (в м³/с): Белгородский – 9, Прорва – 519, Потаповский – 279, Гнеушев – 171, Полуденный – 149, Анкудинов – 206, Быстрый – 1020, Восточный – 153 и Старостамбуль-

лизировано распределение стока БВ в дельте, а также установлены закономерности его изменения на участке Вилково – взморье. Объем данных квазисинхронных съёмок составил, в среднем, по 90 определений азота и по 50 фосфора и кремния.

По материалам многолетних наблюдений (в том числе и несинхронных, в среднем, по 275 определений азота и 190 определений фосфора) рассчитан вынос биогенов в створе Вилково и в море с использованием установленных для более коротких рядов закономерностей. Средняя за сутки концентрация в районе Вилково и в рукавах дельты определялась как средняя арифметическая в конкретных створах, по ней рассчитывались статистические характеристики для анализа изменчивости - диапазон изменения, среднее за многолетний период, медиана, среднеквадратическое отклонение (СКО), экстремумы, коэффициент вариации (КВ – отношение СКО к среднему).

ский – 1460. Невязка стока в дельте (1,2 %) была в пределах точности расчета. Таким образом, наиболее водными являются рукава Старостамбульский и Быстрый (Новостамбульский), наименее водным – Белгородский.

Расход воды для расчёта выноса в водотоках дельты принимался по данным [12], где приводится расход в истоках и среднем течении рукавов. При этом сделано допущение, что приводимый в изданиях ГВК расход воды примерно равен расходу воды в устьях рукавов, что допустимо при осреднении данных за многолетний период. Однако, при анализе внутригодовых изменений расхода воды в рукавах Килийской дельты, а особенно краткосрочных, это допущение может приводить к существенным погрешностям, так как в системах Очаковского и Старостамбульского рукавов отмечается аккумуляция воды в период повышенной водности и водоотдача в межень. Кроме того, в рукава Килийской дельты при нагонах (особенно в период низкой водности) проникают воды взморья, в устьях водотоков формируется обратный (направленный против течения реки) или разнонаправленный поток воды (в придонном слое отмечается поступление морских вод). Довольно часто такие явления отмечаются в рук.Прорва. Дальность проникновения морских вод в водотоки Килийской дельты обычно ограничивается 2 – 3 км, но иногда клин осолоненных вод поступал к вершине внешней дельты (Вилково). В других рукавах этот процесс ещё недостаточно изучен. В связи с этим, измерение составляющих расхода воды (скорости течения и площади живого сечения) и расчёт расхода воды, обуславливающего вынос веществ на взморье, в устьях рукавов требует постановки специальных экспедиционных исследований и расчётов, которые пока не выполнялись.

Концентрация БВ в Килийской дельте и её изменчивость. Отбор проб воды для определения концентрации БВ в створах осуществлялся в Вилково (ст.6, 6а, 6б) и в устьях рукавов на ст.7 – 14 (рис.1). В основном пробы отбирались с поверхностного и придонного горизонтов на вертикалях, расположенных на середине водотоков. Однако, в связи с хорошим перемешиванием речных вод, можно считать, что концентрация БВ в сечении потока в районе Вилково распределена квазиоднородно. Концентрация, определяемая в устьях рукавов, из-за проникновения вод взморья в рукава, может характеризовать как содержание БВ в речной, так и в морской воде. В последнем случае возможное различие между концентрацией в Вилково и у морского края дельты (МКД) связано не с изменениями содержания веществ при их транспорте в Килийской дельте, а с взаимодействием речных и морских вод на устьевом взморье.

При пониженном стоке реки причиной получения более низкой концентрации веществ в устьях рукавов по сравнению с вершиной дельты может быть и то обстоятельство, что отбор проб воды в устьях рукавов производился раньше, чем происходило продвижение водной массы от Вилково к морскому краю дельты (время добегания водной массы было меньше скорости движения плавсредства).

Для выяснения степени трансформации биогенных веществ в Килийской дельте Дуная и анализа пространственной изменчивости их транспорта получены эмпирические зависимости средней концентрации БВ в устьях рукавов (рассчитанной как среднее арифметическое значение по данным ст.7 – 14 за

каждую съёмку) от соответствующих величин в створе Вилково. Уравнения регрессии построены для различных сезонов и для года в целом. Оценка тесноты связи выполнена по коэффициентам детерминации и корреляции.

Концентрация БВ в устьях рукавов тесно связана с их содержанием в вершине Килийской дельты, коэффициенты корреляции имели значения 0,93 – 0,98.

Результаты статистического анализа рядов концентрации БВ в Вилково представлены в табл.1. В таблицах и тексте использованы не молярные (в соответствии с системой СИ), а весовые единицы концентрации и выноса вещества, поскольку это более наглядно и удобно для сопоставления с другими опубликованными оценками концентрации и выноса БВ в устьевой области р.Дунай. Заинтересованный читатель может легко получить цифры в молярных единицах с помощью соотношений: для соединений азота 1 мкмоль = 0,0714 мкгN; для соединений фосфора 1 мкмоль = 0,0313 мкгP; для кремния 1 мкмоль = 0,0357 мкгSi. Далее обозначения вещества (*N*, *P*, *Si*) в весовых единицах опущены, поскольку в каждом случае ясно, к какому соединению относятся единицы концентрации.

Средняя концентрация аммонийного азота на станциях в вершине дельты и в рукавах за рассматриваемый период изменялась в широких пределах: от 0 до 4000 мкг/дм³, причём средняя концентрация в различные периоды отличалась в 3 – 6 раз. Например, с 1976 по 1981 гг. она составляла в вершине дельты 724 мкг/дм³, а с 1982 по 2003 гг. 120 мкг/дм³. Из всех форм азота наименее устойчивым является *N-NH₄*, поэтому его изменчивость во времени – наибольшая. В среднем за год концентрация аммонийного азота в вершине Килийской дельты (Вилково) и в устьях рукавов была почти одинаковой и составила 360 мкг/дм³, СКО = 530 мкг/дм³. Полученное значение содержания аммонийного азота не превышало ПДК и было на 8 % меньше приведенного в [6] для периода с 1977 по 1996 гг. Однако, в различные сезоны года изменение концентрации от вершины Килийской дельты к МКД было различным. Весной и летом, при повышенном стоке воды и хорошем перемешивании, концентрация аммония в Килийской дельте была распределена равномерно. В период осенней межени содержание аммонийного азота уменьшалось по направлению к морю, возможно, из-за его усвоения фитопланктоном в дельте, количество которого увеличивалось в том же направлении. Кроме того, уменьшению концентрации аммония в этот период года могло способствовать его окисление до нитритных ионов в аэробных условиях.

Т а б л и ц а 1. Статистические характеристики концентрации биогенных веществ в Вилково по материалам синхронных съёмок 1976 – 2003 гг.

характеристика	ингредиент, мкг/дм ³						
	<i>N-NH₄</i>	<i>N-NO₂</i>	<i>N-NO₃</i>	<i>DIN</i>	<i>P-PO₄</i>	<i>TP</i>	<i>SiO₃</i>
среднее	360	26	586	1025	103	225	2680
диапазон	0 – 2000	0 – 189	0 – 3310	10 – 3254	14,5 – 418	66 – 970	0 – 8405
медиана	150	20	140	837	77	163	2475
СКО	530	26	742	789	81,6	184	1737
КВ, %	147	100	127	77	79	82	65

Зимой концентрация аммонийного азота увеличивалась по направлению к устьям рукавов, так как в дельте, вероятно, преобладали процессы аммонификации, т.е. разложения азотсодержащих органических веществ с выделением аммиака. Максимальная концентрация отмечалась в марте, когда еще не началось массовое снеготаяние в горных районах, которое способствует разбавлению дунайских вод и уменьшению концентрации, минимальная - в сентябре. В рассматриваемый период наибольшая средняя концентрация аммонийного азота отмечалась в рукаве Потаповском, наименьшая - в Белгородском, что отличается от данных, приведенных в [8] для периода 1971-1984 гг.

Средняя концентрация нитритов за рассматриваемый период в районе Вилково и в устьях дельтовых рукавов была одинаковой и составляла 26 мкг/дм^3 (на 30 % выше ПДК). Изменчивость концентрации нитритов во времени в вершине Килийской дельты и в устьях рукавов существенна, значение СКО сопоставимо со средними величинами концентрации и даже превышает их. Наибольшая средняя за многолетний период концентрация ($29,1 \text{ мкг/дм}^3$) отмечалась в рук.Белгородском, наименьшая ($23,5 \text{ мкг/дм}^3$) - в рук.Старостамбульском. Максимальное значение средней по глубине концентрации нитритов составило 227 мкг/дм^3 (11,4 ПДК) и наблюдалось в мае 1984 г. в рук.Восточном. Весной и летом содержание нитритов обычно увеличивалось от вершины дельты к ее морскому краю, осенью и зимой уменьшалось в тех же пределах. Максимум отмечался в апреле - мае, минимум - в сентябре - октябре.

Диапазон изменения концентрации нитратов - от 0 до 3310 мкг/дм^3 . Во времени изменчивость концентрации была существенной: с 1976 по 1988 гг. средняя многолетняя концентрация составляла в Вилково $85,3 \text{ мкг/дм}^3$, а с 1989 по 2003 гг. 1352 мкг/дм^3 (в 16 раз больше, чем в предыдущий период). Среднее содержание нитратов в Вилково (586 мкг/дм^3) не превышало ПДК, СКО было равно 742 мкг/дм^3 . Средняя за год концентрация уменьшалась от Вилково к морскому краю дельты на 10 % (уменьшение концентрации отмечалось весной и осенью, летом она несколько увеличивалась, а зимой не изменялась). Средняя концентрация в Вилково в рассматриваемый период была в 1,7 раз меньше приведенного в [6] значения. Наибольшее содержание нитратов отмечалась в рук.Быстром, наименьшее - в рук.Белгородском. Концентрация достигала максимума в апреле и минимума - в октябре.

В связи с тем, что в районе Вилково не выполнялись определения общего азота, анализировалась только концентрация его неорганической фракции *DIN* (сумма концентраций аммонийного, нитритного и нитратного азота). В среднем за многолетний период концентрация *DIN* на участке Вилково - устья рукавов уменьшалась на 2 %. Наибольшее содержание *DIN* отмечалось в рук.Потаповском (956 мкг/дм^3), наименьшее - в рук.Старостамбульском (823 мкг/дм^3). Средняя за 1976 - 2003 гг. концентрация *DIN* в устьях рукавов составляла 1001 мкг/дм^3 , СКО = 740 мкг/дм^3 , а в районе Вилково 1025 мкг/дм^3 , СКО = 789 мкг/дм^3 . Весной и летом, при повышенном стоке Дуная, концентрация *DIN* распределялась по пространству равномерно, однородная водная масса поступала транзитом в море, суммарная концентрация азотистых соединений не изменялась в дельте реки. Осенью содержание *DIN* на участке Вилково - устья рукавов в среднем уменьшалось на 13 %,

зимой увеличивалось на 36 %. Очевидно, осенью преобладала деструкция и поглощение соединений азота гидробионтами; зимой, в результате их отмирания и распада, обогащение водной массы минеральным азотом.

Так как ряды наблюдений за соединениями фосфора в дунайской воде меньше (1980 – 2003 гг.), чем за концентрацией азотистых соединений, обобщение данных выполнялось за весь период наблюдений без выделения сезонов. Концентрация фосфатов была распределена по пространству дельты почти однородно и равнялась 103 мкг/дм^3 (меньше ПДК, невязка концентрации между вершиной дельты и устьями рукавов в среднем не превышала 2 %), СКО составляло $81,6 \text{ мкг/дм}^3$.

Средняя концентрация общего фосфора в вершине Килийской дельты составляла 226 мкг/дм^3 , а в устьях рукавов $212 - 240 \text{ мкг/дм}^3$, в среднем 225 мкг/дм^3 . Следовательно, содержание фосфора общего в Вилково и в рукавах в среднем было одинаковым. СКО концентрации *TP* в устьях рукавов дельты и в её вершине составляло 184 мкг/дм^3 .

Концентрация кремния распределялась по пространству достаточно однородно (различия не превышали 5 %) и составляла в среднем за период с 1980 по 2003 гг. 2680 мкг/дм^3 , СКО = 1737 мкг/дм^3 . Летом и осенью, в основном, происходило уменьшение концентрации кремния в дельте, весной кремний транзитом поступал в море со стоком половодья, зимой в устьях дельтовых водотоков концентрация кремния была несколько больше, чем в Вилково.

Из табл.1 видно, что более всего изменялась во времени концентрация аммонийного азота и нитратов, наименьшей изменчивостью характеризовалось содержание кремния в воде. В основном, максимальная концентрация БВ наблюдалась весной, минимальная – осенью, что согласуется с литературными данными.

Отклонения статистических характеристик, рассчитанных по материалам синхронных съемок, от аналогичных характеристик, определенных за весь период наблюдений, оказались различными для разных элементов. Содержание нитритов, *DIN* и *TP* было примерно в тех же пределах, нитратов и фосфатов содержалось в воде на 25 – 35 % меньше, а кремния и аммонийного азота – на 25 и 50 % больше соответственно. Средняя за многолетний период, рассчитанная по всем имеющимся наблюдениям, концентрация рассматриваемых ингредиентов (в мкг/дм^3) составила в Вилково: аммонийного азота – 238, нитритов – 29.2, нитратов – 794, суммы азотистых соединений – 1067, фосфатов – 160, фосфора общего – 265 и кремния – 2143.

Изменчивость концентрации БВ в 2 – 4 раза больше изменчивости расхода воды, поэтому, очевидно, вклад концентрации в изменчивость расхода (стока) биогенных веществ является преобладающим.

Таким образом, в рассматриваемом районе, в основном, отмечается пространственная однородность средней годовой концентрации БВ и существенная изменчивость концентрации между съемками. Большая изменчивость во времени концентрации БВ в Килийской дельте может быть обусловлена наличием непостоянных источников поступления БВ (смыв с территорий, сбросы сточных вод и др.), неустойчивостью форм азота, а также несовершенством системы наблюдений.

Величины и изменчивость стока БВ. Средний вынос биогенных веществ за каждую съёмку рассчитывался по общепринятым формулам для каждой съёмки:

$$W_{Вил} = Q_{Вил} \cdot C_{Вил}; \quad (1)$$

$$W_{рук} = Q_{рук} \cdot C_{рук}; \quad (2)$$

$$W_{сум} = \sum W_{рук}, \quad (3)$$

где $W_{Вил}$, $W_{рук}$, $W_{сум}$ – расход БВ (г/с) в Вилково, в отдельных рукавах Килийской дельты и суммарный вынос БВ рукавами соответственно; $Q_{Вил}$, $Q_{рук}$ – расход воды (м³/с) в Вилково и в отдельных рукавах соответственно; $C_{Вил}$, $C_{рук}$ – концентрация БВ (мкг/дм³) в Вилково и в устьях рукавов соответственно.

Для каждой съёмки по (1) рассчитывалось поступление БВ в Вилково, при этом $C_{Вил}$ определялась как средняя арифметическая в створе измерений, а $Q_{Вил}$ принимался по [12] на дату отбора пробы. Расход БВ в рукавах дельты определялся по (2), причём, в рукавах расход воды $Q_{рук}$ принимался также по [12] с учётом времени добегания, а концентрация $C_{рук}$ рассчитывалась как средняя арифметическая в створе каждого рукава. Суммированием значений выноса БВ каждым рукавом ($\sum W_{рук}$) определялось поступление БВ к морскому краю дельты за конкретные сутки. Эта величина приравнивалась к выносу БВ в море. Относительная ошибка расчёта расхода (выноса) БВ, согласно [2], находится в пределах 12 – 33 %.

Статистические зависимости между поступлением БВ в Вилково и суммарным выносом рукавов имеют, как и зависимости между концентрациями в этих створах, высокие коэффициенты корреляции (табл.2).

Сравнение значений концентрации, расхода воды и выноса в районе Вилково и у МКД показало, что изменения выноса как в указанных створах за многолетний период, так и на этом участке в период съёмок обусловлены различиями в концентрации элементов, о чем свидетельствует согласованный ход выноса и концентрации биогенных веществ.

Анализ полученных эмпирических зависимостей свидетельствует о том, что суммарный вынос биогенных веществ рукавами зависит от поступления БВ в вершину Килийской дельты (Вилково). Этот вывод позволил использовать полученные по данным синхронных съёмок уравнения для расчета выноса биогенных веществ Килийским рукавом Дуная в море по данным более продолжительного ряда наблюдений в Вилково. Высокие коэффициенты детерминации и корреляции свидетельствуют о возможности расчета выноса БВ в море по данным наблюдений в Вилково с достаточной степенью точности – обеспеченность метода 84 – 98 %, согласно [13].

Для рядов выноса БВ, рассчитанного по (1) по данным квазисинхронных съёмок (1976 – 2003 гг.), определялся средний вынос конкретного БВ, как среднеарифметическое значение. Результаты расчёта статистических характеристик поступления биогенных веществ в Вилково по этим данным представлены в табл.3. Величины выноса, рассчитанные таким способом, отличаются от выноса, определяемого по методике [2] путём осреднения расхода воды и концентрации за расчётный период и последующего перемножения средних величин.

Средний за рассматриваемый период вынос аммонийного азота в створе Вилково составил 1430, а суммарный вынос рукавами Килийской дельты 1440 г/с (средняя невязка выноса аммонийного азота в дельте 0,7 %). Макси-

Т а б л и ц а 2. Уравнения регрессии для расчета выноса биогенных веществ рукавами ($W_{\text{сум}}$) по данным об их поступлении в вершину Килийской дельты ($W_{\text{Вил}}$).

расчетный период	уравнение	коэффициент корреляции
<i>аммонийный азот</i>		
весна	$W_{\text{сум}} = 0,92 W_{\text{Вил}} + 176$	0,93
лето	$W_{\text{сум}} = 1,00 W_{\text{Вил}} + 15,4$	0,94
осень	$W_{\text{сум}} = 1,26 W_{\text{Вил}} - 74,9$	0,97
зима	$W_{\text{сум}} = 0,88 W_{\text{Вил}} + 285$	0,94
год	$W_{\text{сум}} = 0,95 W_{\text{Вил}} + 80,4$	0,93
<i>нитритный азот</i>		
весна	$W_{\text{сум}} = 0,76 W_{\text{Вил}} + 54,8$	0,91
лето	$W_{\text{сум}} = 0,53 W_{\text{Вил}} + 7,67$	0,91
осень	$W_{\text{сум}} = 0,83 W_{\text{Вил}} - 4,83$	0,89
зима	$W_{\text{сум}} = 0,19 W_{\text{Вил}} + 47,8$	0,89
год	$W_{\text{сум}} = 0,77 W_{\text{Вил}} + 15,2$	0,89
<i>нитратный азот</i>		
весна	$W_{\text{сум}} = 1,06 W_{\text{Вил}} + 2,98$	0,98
лето	$W_{\text{сум}} = 1,03 W_{\text{Вил}} + 2,08$	0,96
осень	$W_{\text{сум}} = 1,09 W_{\text{Вил}} + 22,2$	0,96
зима	$W_{\text{сум}} = 1,17 W_{\text{Вил}} - 42,2$	0,93
год	$W_{\text{сум}} = 0,91 W_{\text{Вил}} + 54,0$	0,98
<i>растворенный неорганический (суммарный) азот</i>		
весна	$W_{\text{сум}} = 0,73 W_{\text{Вил}} + 1413$	0,91
лето	$W_{\text{сум}} = 1,02 W_{\text{Вил}} - 115$	0,92
осень	$W_{\text{сум}} = 0,89 W_{\text{Вил}} + 2,97$	0,92
зима	$W_{\text{сум}} = 1,42 W_{\text{Вил}} - 282$	0,98
год	$W_{\text{сум}} = 0,91 W_{\text{Вил}} + 226$	0,94
<i>фосфатный фосфор</i>		
год	$W_{\text{сум}} = 0,95 W_{\text{Вил}} + 24,5$	0,93
<i>фосфор общий</i>		
год	$W_{\text{сум}} = 1,11 W_{\text{Вил}} - 125$	0,98
<i>кремний</i>		
год	$W_{\text{сум}} = 1,05 W_{\text{Вил}} - 298$	0,99

мальный вынос аммония отмечался в марте, минимальный – в сентябре. Весной и летом концентрация аммония в Килийской дельте распределена равномерно из-за хорошего перемешивания, поэтому сток аммонийного азота в вершине и в устьях рукавов почти одинаков, средняя невязка в пределах 1 %. Осенью, в период межени, вынос аммония в море на 7 % меньше, чем в Вилково, а зимой вынос в море превышал вынос в Вилково на 11,7 %.

Средний вынос нитритов в Вилково составлял 111, суммарный вынос рукавами Килийской дельты в море 105 г/с (средняя невязка выноса нитритов не превышала 5 %). Максимальный вынос нитритов отмечался в мае, минимальный – в сентябре.

Поступление нитратов в среднем за период квазисинхронных съёмок в 1976 – 2003 гг. в Вилково составляло 2190, а суммарное, рукавами Килийской дельты, в море 2080 г/с (средняя невязка выноса 5 %). Максимальный вынос нитратов отмечался в апреле, минимальный – в октябре.

Средний суммарный вынос соединений минерального азота в Вилково составлял 4030, суммарный вынос рукавами Килийской дельты в море 3590 г/с (средняя невязка выноса 11 %). В боль-

шую часть года вынос соединений минерального азота уменьшался на участке Вилково – морской край дельты, зимой он увеличивался.

Вынос фосфатного и общего фосфора практически не изменялся на участке Вилково – морской край дельты и составлял в среднем 370 и 905 г/с

Т а б л и ц а 3. Статистические характеристики выноса биогенных веществ в Вилково по данным синхронных съёмок 1976 – 2003 гг.

характеристика	вынос ингредиента, г/с						
	<i>N-NH₄</i>	<i>N-NO₂</i>	<i>N-NO₃</i>	<i>DIN</i>	<i>P-PO₄</i>	<i>TP</i>	<i>SiO₃</i>
среднее	1430	111	2190	4030	370	905	11200
медиана	520	82.6	689	2770	289	638	8940
диапазон	0 – 12080	0 – 968	0 – 11804	28,8 – 13185	78 – 1652	119 – 4966	0 – 34397
СКО	2370	133	3001	3728	308	904	9310
КВ, %	166	120	137	93	83	100	82

соответственно, невязка не превышала в среднем 2 %.

Средний вынос кремния в вершину дельты и в море различался в пределах 2 % и составлял 11200 г/с.

Распределение выноса БВ между рукавами дельты зависит от стоковой составляющей и аналогично распределению расхода воды, т.к. содержание БВ, как, впрочем, и других элементов, в водотоках достаточно однородное из-за хорошего перемешивания речной воды.

Для сравнения полученных результатов, в том числе и с литературными источниками, выполнена оценка стока биогенных веществ в Килийском рукаве Дуная (Вилково) в соответствии с рекомендациями [2] для периода с 1976 по 2003 гг. по всем данным и материалам синхронных съёмок за тот же период:

$$W_{Кул} = Q_{cp} \cdot C_{cp} \cdot T, \quad (4)$$

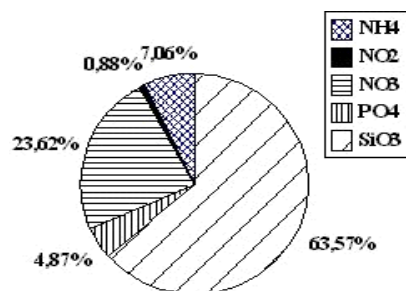
где $W_{Кул}$ – средний за многолетний период сток БВ Килийского рукава (тыс. т/год); Q_{cp} – средний многолетний расход воды в Вилково ($м^3/с$); C_{cp} – средняя многолетняя концентрация БВ в Вилково ($мкг/дм^3$); T – число секунд в году, принятое равным $31,54 \cdot 10^6$. Результаты расчетов по (4) приведены в табл.4. Там же содержатся и результаты расчёта стока БВ по данным квазисинхронных съёмок.

$$W_{Кул} = [(\Sigma W_{Вил})/n] \cdot 31,54 \cdot 10^6, \quad (5)$$

где $[(\Sigma W_{Вил})/n]$ – средний из всех съёмок вынос БВ в Вилково (г/с), представленный в табл.3 и состоящий из суммы расходов биогенов ($\Sigma W_{Вил}$) по ряду квазисинхронных съёмок длиной n , а $W_{Вил}$ – расход БВ, определенный по (1) для каждой съёмки.

Т а б л и ц а 4. Сток БВ Килийским рукавом р.Дунай в Вилково (тыс. т/год) по разным рядам наблюдений и методам расчета.

$Q_{Вил}, м^3/с$	<i>N-NH₄</i>	<i>N-NO₂</i>	<i>N-NO₃</i>	<i>DIN</i>	<i>P-PO₄</i>	<i>TP</i>	<i>SiO₃</i>
1976 – 2003 гг., формула (4)							
3860	29,0	3,55	96,6	130	19,5	32,2	261
1976 – 2003 гг. (синхронные съёмки), формула (4)							
4020	45,6	3,30	74,3	130	13,1	28,5	339
1976 – 2003 гг. (синхронные съёмки), формула (5)							
4020	45,1	3,50	69,1	127	11,7	28,5	353



Р и с . 2 . Процентное соотношение БВ в суммарном выносе Килийской дельты р. Дунай.

выноса БВ в море от их поступления в Вилково, вынос БВ на устьевое взморье составляет (тыс. т/год): 30 аммонийного азота, 3,3 нитритов, 90 нитратов, 126 минерального азота, 19,5 фосфатов, 32 общего фосфора, 264 кремния.

Сравнение результатов расчета выноса БВ в районе Вилково и суммарного выноса дельтовых рукавов показывает, что различия между соответствующими значениями выноса, в основном, не превышают 8 %. Поэтому для приближенной оценки многолетних значений выноса БВ в море можно использовать его значения в районе Вилково.

Как видно из табл.4, наибольшие расхождения в величинах стока БВ выявляются при сравнении результатов, полученных одним методом, но по выборкам различной длины; расчёты по одинаковым рядам, но разными методами, дают большую сходимость результатов (отклонения не превышали 12 %). Наибольшие различия (57 %) отмечаются при сравнении стока аммонийного азота по данным синхронных съёмок и рассчитанного по всем имеющимся наблюдениям. Это, вероятно, связано с большой временной изменчивостью концентрации $N-NH_4$. Менее всего зависят от длины ряда величины стока нитритов, DIN и TP .

Выводы. Полученные по данным многолетних гидролого-гидрохимических наблюдений в Килийской дельте р. Дунай статистические оценки величин и изменчивости концентрации и стока растворенных биогенных веществ являются основой для уточнения более ранних результатов расчётов, сопоставления с имеющимися литературными данными и материалами текущих наблюдений.

Установление тесных корреляционных зависимостей между выносом БВ в верхнем (Вилково) и нижних (у морской края дельты) створах позволило обосновать возможность расчёта выноса БВ Килийским рукавом Дуная на устьевое взморье по их поступлению в вершину Килийской дельты. Отсутствие материально-технических возможностей в ближайшем будущем с достаточной точностью определять вынос БВ в море по данным в устьях рукавов (из-за указанных особенностей взаимодействия речных вод с водами устьевого взморья) делает предлагаемый способ расчёта наиболее обоснованным в настоящее время и позволяет использовать данные учащенных наблюдений в Вилково, полученные при выполнении международной программы, для уточненной оценки поступления БВ в Черное море.

Полученные результаты предполагается далее использовать для деталь-

За последние 25 – 30 лет в район Вилково поступало, в среднем (тыс. т/год), 29 аммонийного азота, 3,6 нитритов, 96,6 нитратов, 130 минерального азота, 19,5 фосфатов, 32 общего фосфора, 261 кремния.

Структура выноса БВ представлена диаграммой (рис.2), из которой видно, что в нём преобладает кремний и нитраты, меньший вклад в общий вынос биогенных веществ вносят аммонийный азот, фосфаты и нитриты.

Согласно полученным зависимостям

ного анализа выноса БВ Килийским рукавом по данным еженедельных наблюдений у Вилково 2003 – 2004 гг. и расчёта суммарного выноса БВ Дунай за этот период с учетом данных, полученных румынскими учеными в устьях Сулинского и Георгиевского рукавов. Также они могут найти применение при оценке изменений стока биогенных веществ вследствие строительства и эксплуатации судового хода в рук.Быстром, при планировании рыбохозяйственной деятельности и других водохозяйственных мероприятий в устьевой области р.Дунай.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ильин Ю.П., Репетин Л.Н., Морозов В.Н., Берлинский Н.А., Гринько О.С., Крылов В.И.* Исследования поступления биогенных веществ в Черное море с речным стоком в рамках международного проекта BSERP/GEF // Экологические проблемы Черного моря. Мат. 6-го Междунар. симп., 11-12.11 2004.– Одесса: ОЦНТЭИ, 2004.– С.198-202.
2. *Временные методические рекомендации по расчету выноса органических биогенных веществ, пестицидов и микроэлементов речным стоком.*– М.: Гидрометеоиздат, 1983.– 32 с.
3. *Симов В.Г.* К вопросу о методах расчёта выноса загрязняющих веществ в море с речным стоком // Тр. УкрНИГМИ.– 1998.– 246.– С.174-182.
4. *Симов В.Г., Бочарова Л.В.* Вынос нефтяных углеводородов, хлорорганических пестицидов и летучих фенолов в Черное море со стоком воды р.Дунай // Диагноз состояния экосистемы Черного моря и зоны сопряжения суши и моря. Тр. научн. конф., 29.09-03.10 1997, пос.Кацивели.– Севастополь: МГИ НАНУ, 1997.– С.105.
5. *Миньковская Р.Я.* Оценка выноса нефтяных углеводородов речными водами. // Диагноз состояния среды прибрежных и шельфовых зон Черного моря.– Севастополь: МГИ НАНУ, 1996.– С.82-91.
6. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.IV. Черное море. Вып.2. Гидрохимические условия и океанологические основы биологической продуктивности / Под ред. А.И.Симонова, А.И.Рябинина, Д.Е.Гершановича.*– СПб: Гидрометеоиздат, 1992.– 219 с.
7. *Гаркавая Г.П., Богатова Ю.И., Берлинский Н.А.* Особенности формирования гидрохимических условий украинской части устьевой области Дуная // Экосистема взморья украинской дельты Дуная.– Одесса: Астропринт, 1998.– С.21-62.
8. *Енаки И.Г.* Гидрохимический режим советского участка Дуная // Гидробиологические исследования Дуная и придунайских водоемов.– Киев: Наукова думка, 1987.– С.14-26.
9. *Бюллетень состояния химического загрязнения Черного и Азовского морей.*– Севастополь: СО ГОИН - МО УкрНИГМИ, 1976-1984.
10. *Ежегодные гидрохимические данные о качестве морских вод.*– Севастополь: СО ГОИН - МО УкрНИГМИ, 1984-2003.
11. *Научно-технический отчет Дунайской гидрометеорологической обсерватории.*– Измаил: ДГМО, 1976-2003.
12. *Государственный Водный Кадастр. Разд.1. Поверхностные воды. Сер.2. Ежегодные данные: Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек. Ч.2. Устья рек.*– Севастополь: СО ГОИН - МО УкрНИГМИ, 1976-2003.
13. *Инструкция по оценке качества методов и оправдываемости морских гидрологических прогнозов.*– М.: Гидрометеоиздат, 1965.– 88 с.

Материал поступил в редакцию 15.03.2005 г.
После доработки 6.06.2005 г.