

А.А. Морозова

ОЦЕНКА СТОКА РАСТВОРЕННОГО И ВЗВЕШЕННОГО ЖЕЛЕЗА ИЗ ДНЕПРОВСКО – БУГСКОЙ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ В ЧЕРНОЕ МОРЕ

В работе приведен расчет стока растворенного и взвешенного железа из Днепроовско-Бугской устьевой области в Черное море, сделанный на основании данных многолетних наблюдений. Показано, что по мере продвижения водной массы от нижнего бьефа Каховской ГЭС к Черному морю сток значительно трансформируется в устьевой области рек – Днепроовско-Бугском лимане. Среднегодовая величина стока $Fe_{\text{раств.}}$ и $Fe_{\text{взв}}$ составила 3,56 и 91,98 тыс. т. соответственно.

Введение

Речной сток является одним из основных источников поступления растворенного и взвешенного вещества в моря и океаны. Исследования закономерностей его формирования – задача весьма актуальная и сложная. С одной стороны, реки аккумулируют все поверхностные стоки со своих водосборных площадей, включая все виды антропогенных стоков, а с другой, как основные источники водоснабжения, подвергаются загрязнению и изъятию воды. В настоящее время речные системы в большинстве своем имеют измененный водный режим. Это в полной мере относится и к основной водной артерии Украины – р. Днепр. В связи со значительными изменениями в гидрологическом и гидрохимическом режиме экосистемы Черного моря, и особенно его северо-западной части, находящейся под непосредственным влиянием речного стока, изучение выноса растворенных и взвешенных веществ водными массами Днепра в море, представляет особый интерес.

Сложность изучения и расчета этого стока заключается в том, что при его транспортировке к морю, он претерпевает значительные изменения не только в самом русле реки по ее течению, но и в ее устьевой области. Это обусловлено, как особенностями гидрологического режима, так и значительным антропогенным воздействием.

Железо является необходимым биоэлементом и имеет большое значение для развития, роста и жизнедеятельности водных организмов. Оно активно участвует в окислительных и энергетических обменах,

происходящих в водоеме [10]. В начале вегетационного периода этот биоэлемент интенсивно потребляется не только планктонными организмами, но и высшей водной растительностью. Водные растения утилизируют железо не только в растворенной форме, но и во взвешенной. Экспериментами Х.В.Харвея и Э.Д.Гольдберга [12, 13] было доказано, что взвешенное железо также является одним из элементов питания фитопланктона. Наиболее требовательны к содержанию железа диатомовые водоросли. По данным А.П.Лисицына [9] диатомовая взвесь содержит в среднем 2,3 % железа.

Основная масса железа, поступающая в моря с речным стоком, находится во взвешенном состоянии (80-90% его суммарного содержания) [2, 10]. В растворенном состоянии железо выносится реками в значительно меньших количествах. Так, для рек бассейна Черного и Азовского морей, М.А.Глаголевой получены следующие цифры выноса железа: во взвеси – 80-99 %, в растворе – 1-20 % [2].

Изучением стока растворенного и взвешенного железа из рек и эстуариев занимались многие исследователи [4, 8]. Некоторые данные о стоке растворенного и взвешенного железа Днепра за период 1956-1969 гг. приведены в работе А.И.Денисовой, согласно которым из Каховского водохранилища в Нижний Днепр попадает примерно 2,5 и 3,0 тыс. т. растворенного и взвешенного железа соответственно [5]. Однако из-за применения различных методик определения содержания общего взвешенного железа в воде данные, полученные Денисовой А.И. и нами по стоку общего взвешенного железа, несопоставимы. Расчеты стока последнего из Днепра в Черное море ранее не производились.

Материал и методика исследований

Расчет стока в Черное море взвешенного железа ($Fe_{взв.}$) в створе нижнего бьефа Каховской ГЭС, основных рукавов дельты Днепра (Рвач, Бакай, Конка) и устьевого взморья – Днепровско-Бугского лимана, произведен на основе данных экспедиционных и стационарных наблюдений (1986-1988, 1992 и 1993 гг.). Для определения стока растворенного железа ($Fe_{раств.}$) период наблюдений составил с 1963 по 1993 гг. В основу расчета были положены как исследования водного режима, так и изучение факторов формирования водных масс, особенности пространственного и временного распределения их по акватории водоема в зависимости от режима работы Каховской ГЭС. Все это позволило определить количественные и качественные

характеристики стока растворенного и взвешенного железа с учетом его изменения по мере продвижения речного потока от нижнего бьефа Каховского водохранилища к Черному морю. Расчет проводили на средний по водности год ($42 \text{ км}^3/\text{год}$).

Растворенное общее железо определялось по общепринятой в гидрохимической практике методике [1]. Для определения общего взвешенного железа в наших исследованиях был использован метод персульфатного окисления с последующим определением по методике И.К.Степановой [11]. Его концентрация для каждого створа рассчитывалась как средневзвешенная. В связи с отсутствием зимних натуральных данных в работе приводится расчетная величина его стока за это время.

Результаты исследований и их обсуждение

Сложность изучения и расчета стока р. Днепр в Черное море заключается в том, что при транспортировке к морю, он претерпевает значительные изменения не только в самом русле реки по ее течению, но и в устьевой области – Днепровско-Бугском лимане.

Расчеты показали, что сток растворенного и взвешенного железа в створе плотины Каховского водохранилища, поступающий вместе с попусками воды в нижнее течение Днепра из вышележащих водохранилищ составил 1,89 и 49,2 тыс. т. соответственно (табл. 1). Отмечена тенденция уменьшения стока растворенного железа по сравнению с периодом 1956-1969 гг. на 24,4 %. Во внутригодовом аспекте максимум стока как $\text{Fe}_{\text{раств.}}$, так $\text{Fe}_{\text{взв.}}$ приходился на весенний период и был обусловлен повышенным поверхностным стоком в период прохождения паводка. Осенью наблюдался минимум стока растворенного железа и значительное повышение стока взвешенного. Это связано с увеличением его содержания в воде каскада в результате разложения органического вещества воды и десорбции его из донных отложений под действием ветрового перемешивания водной массы в этот период [6, 7]. По данным А.И.Денисовой [5] именно в период осенней циркуляции железо в воде находится во взвешенном состоянии.

Соотношение стока $\text{Fe}_{\text{раств.}}$ и $\text{Fe}_{\text{взв.}}$ железа в створе плотины Каховской ГЭС неодинаково в течение года. Максимальное превышение стока взвешенного железа над растворенным наблюдалось ранней весной (III) и осенью (XI), а минимальное – в летний период, в среднем за год составляя 1:26.

Таблица 1

Внутригодовое распределение стока общего растворенного и взвешенного железа (тыс. т.) в створе плотины Каховского водохранилища и рукавах дельты Днепра (Рвач, Бакай, Конка)

Ингредиент	Месяц												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Каховское водохранилище, нижний бьеф													
Fe _{раств.}	0,019	0,338	0,025	0,383	0,464	0,124	0,128	0,109	0,043	0,180	0,056	0,025	1,894
Fe _{взв.}	0,335	5,637	13,381	6,301	2,746	1,953	0,893	1,376	1,071	3,886	11,195	0,426	49,200
рукав Рвач													
Fe _{раств.}	0,002	0,141	0,168	0,121	0,205	0,049	0,074	0,061	0,001	0,068	0,144	0,002	1,036
Fe _{взв.}	0,069	1,135	0,991	0,884	1,724	0,396	0,531	0,471	0,321	0,746	0,692	0,086	8,046
рукав Бакай													
Fe _{раств.}	0,040	0,382	0,441	0,341	0,345	0,026	0,072	0,104	0,089	0,155	0,255	0,024	2,274
Fe _{взв.}	0,133	2,221	0,027	1,621	1,975	1,775	0,436	1,291	1,134	1,924	3,240	0,168	15,945
рукав Конка													
Fe _{раств.}	0,046	0,164	0,029	0,025	0,102	0,026	0,026	0,039	0,013	0,047	0,052	0,041	0,610
Fe _{взв.}	0,033	0,552	0,043	0,486	1,124	0,226	0,084	0,190	0,229	0,334	0,826	0,042	4,169
рукава дельты Днепра, ∑ сток													
Fe _{раств.}	0,088	0,687	0,638	0,487	0,652	0,101	0,172	0,204	0,103	0,270	0,451	0,067	3,920
Fe _{взв.}	0,235	3,908	1,061	2,991	4,823	2,397	1,051	1,952	1,684	3,004	4,758	0,296	28,160

Речной поток, а вместе с ним и взвешенные и растворенные в нем вещества, значительно изменяется, проходя по нижнему течению реки. Это обусловлено разветвленностью самой дельты, а также наличием большого количества высокопродуктивных пойменных водоемов, имеющих активный водообмен с основным руслом реки. Наблюдения и расчеты, проведенные на замыкающих створах основных рукавов Днепра, показали, что сток общего взвешенного железа из них в лиман, по сравнению со стоком из створа плотины Каховского водохранилища, уменьшается примерно на 43 % и в среднем составляет 28,16 тыс. т./год (см. табл. 1). Сток растворенного железа, напротив, увеличивается более чем в два раза и составляет 3,92 тыс. т./год. Снижение стока $Fe_{взв.}$ обусловлено как его седиментацией, так и разделением водного потока по основным рукавам дельты. Увеличение стока растворенной формы происходит за счет вымывания его из многочисленных пойменных водоемов, расположенных в дельте Днепра, уровень развития гидробионтов в которых намного выше, чем в основном русле реки. Более интенсивно в них проходят также химические и биохимические внутриводоемные процессы, определяющие динамику как растворенного, так и взвешенного железа. Разделение водной массы на три главных рукава приводит к нарушению и внутригодовой динамики стока как $Fe_{раств.}$, так и $Fe_{взв.}$. Максимальный сток обеих его форм весной сохраняется лишь в рукаве Рвач и может быть обусловлен как увеличением поверхностного стока, так и морфометрическими особенностями данного водотока, а именно – наличием судоходного канала. В то же время именно на весну приходится максимум стока растворенного железа в рукаве Бакай и взвешенного в рукаве Конка, что в полной мере определяется как их водностью, так и внутригодовым распределением. Максимальное количество как $Fe_{раств.}$, так и $Fe_{взв.}$ выносится самым многоводным рукавом Бакай, а минимальное – маловодным рукавом Конка (см. табл. 1). Уменьшение стока взвешенного железа и увеличение растворенного из Каховского водохранилища в нижний Днепр приводит к уменьшению соотношения между двумя его формами, которое практически одинаково во всех рукавах и составляет 1:7.

Трансформация речного потока и распределение в нем как растворенного, так и взвешенного железа по акватории Днепровско-Бугского лимана обусловлена многочисленными факторами. Каждый

район лимана характеризуется своими особенностями режима $Fe_{\text{раств.}}$ и $Fe_{\text{взв.}}$ и их стока.

Сток железа из восточного района лимана формируется под непосредственным влиянием речной водной массы. Наблюдения показали, что при выходе речной водной массы из основных рукавов дельты в восточный район лимана происходит уменьшение стока растворенного железа при значительном увеличении стока взвешенного (табл. 2). Как известно, железо является биоэлементом и активно потребляется гидробионтами, поэтому изменение стока обеих форм железа обуславливается большей биологической продуктивностью района по сравнению с дельтой реки. Это подтверждается и тем, что увеличение стока взвешенного железа происходит за счет его органической составляющей. В восточном районе сохраняется тенденция повышенного стока $Fe_{\text{раств.}}$ и $Fe_{\text{взв.}}$ в весенний период, однако для взвешенного железа максимум отмечается и в осенний период наблюдений. Повышение стока осенью обусловлено гидробиологическими факторами, а именно – в этот период года синезеленые водоросли сменяются диатомовыми. Как известно, диатомовые водоросли обладают аккумулятивной способностью по отношению к железу и накапливают его. В целом восточный район лимана поставляет в его центральную часть около 2,96 тыс. т. растворенного и 55,42 тыс. т. взвешенного железа (см. табл. 2).

Внутригодовое распределение стока растворенного железа в центральном и Бугском районах лимана характеризовалось более равномерным распределением с максимумами зимой и весной. Вместе с тем для стока его взвешенной формы из центрального района сохраняется тенденция двух максимумов в весенний и осенний периоды, тогда как для Бугского лимана максимальные показатели стока отмечались лишь весной. Превышение стока растворенного и взвешенного железа из центрального района лимана, по сравнению со стоком из восточного, составило 18 и 11 % соответственно (см. табл. 2). Сток железа из Бугского лимана на порядок ниже такового из центрального района лимана и составляет 0,27 тыс. т., а взвешенного 1,47 тыс. т. (см. табл. 2). Это, с одной стороны, определяется особенностями его водообмена с Днепровским лиманом, а с другой – максимальными среди всех районов лимана значениями величины первичной продукции [6].

Таблица 2

Внутригодовое распределение стока общего растворенного и взвешенного железа (тыс. т.)
в Днепровско-Бугском лимане

Район лимана	Ингре- диент	Месяц												Год
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Восточный	Fe _{раств.}	0,02	0,58	0,22	0,37	0,55	0,13	0,04	0,15	0,04	0,29	0,029	0,28	2,96
	Fe _{взв.}	0,50	8,33	4,36	4,76	10,35	1,25	2,98	2,51	4,84	1,76	13,15	0,63	55,42
Центральный	Fe _{раств.}	0,27	0,49	0,36	0,28	0,43	0,15	0,10	0,21	0,01	0,55	0,29	0,35	3,49
	Fe _{взв.}	0,39	6,75	5,38	5,77	13,80	1,84	2,08	1,93	6,52	9,46	7,19	0,50	61,61
Бугский	Fe _{раств.}	0,005	0,05	0,01	0,04	0,03	0,004	0,02	0,02	0,003	0,05	0,003	0,03	0,265
	Fe _{взв.}	0,05	0,14	0,29	0,26	-	0,10	0,10	0,21	0,09	0,12	0,10	0,01	1,47
Западный	Fe _{раств.}	0,39	0,32	0,67	0,38	0,19	0,10	0,03	0,26	0,02	0,53	0,37	0,30	3,56
	Fe _{взв.}	3,52	6,06	17,03	7,73	14,37	2,67	1,97	2,28	11,36	4,69	19,85	0,45	91,98

Особенностью Бугского лимана является формирование анаэробных условий с наличием сероводорода в его придонных слоях, что оказывает влияние как на формирование режима железа, так и на его сток. При дефиците кислорода и появлении сероводорода в придонных слоях воды содержание $Fe_{взв.}$ возрастает, что обусловлено образованием сульфидов или гидроокислов железа. Так, для всех районов лимана летний период характеризуется минимальными значениями стока взвешенного железа (12,0, 9,5 и 7,5 % от годового стока соответственно восточный, центральный и западный районы). Лишь для Бугского лимана характерно его значительное увеличение – приблизительно до 28,0 %.

Формирование режима железа в замыкающем западном районе лимана происходит под непосредственным влиянием морской водной массы. Хотя концентрация взвешенного железа в морской воде намного ниже, чем в речной, имеющиеся многочисленные данные [3, 4] свидетельствуют об активном преобразовании в эстуариях растворенного железа во взвешенное. Для западного района лимана характерно незначительное увеличение стока растворенного железа и значимое (приблизительно на 49 %) увеличение стока взвешенного железа по сравнению с таковым из центрального района лимана. При этом величина стока растворенного и взвешенного железа из западного района лимана в Черное море составляет 3,56 тыс. т. и 91,98 тыс. т. (см. табл. 2). Проведенные исследования и расчеты показали, что западный район является дополнительным источником поступления взвешенного железа в Черное море. Внутригодовое распределение стока как растворенного, так и взвешенного железа аналогично таковому в восточном районе.

В соответствии с изменением стока растворенного и взвешенного железа изменяется и соотношение между ними, характеризующееся своими закономерностями распределения как во времени, так и в пространстве. Так, для восточного района лимана, находящегося под влиянием речного стока, характерно постепенное увеличение от зимы к осени соотношения между стоком растворенного и взвешенного железа. Внутригодовая динамика изменения соотношения между величинами их стока для центрального и западного районов была одинаковой, и характеризовалась максимальными значениями в весенний и осенний периоды. В связи с морфологическими и гидрологическими

особенностями Бугского лимана превышение стока взвешенного железа над растворенным и изменение соотношения между ними было отмечено в весенне-летний периоды. Вместе с тем наблюдения показали, что, несмотря на то, что формирование стока как растворенного, так и взвешенного железа по акватории Днепровско-Бугского лимана происходит под действием различных факторов, соотношение между ними в восточном и центральном районах практически одинаково и составляет 1:19 и 1:18 соответственно. Для Западного района, находящегося под влиянием поступления морской водной массы, данное соотношение увеличивается и составляет 1:26. Для Бугского лимана характерно наименьшее соотношение – приблизительно 1:6.

Таким образом, вопреки мнению об осаждающей роли эстуариев в процессе переноса речной водной массы в море, Днепровско-Бугская устьевая область сама является дополнительным источником поступления взвешенного железа при практически неизменной величине стока растворенного. Это определяется его высоким уровнем трофности и интенсивностью происходящих в нем внутриводоемных физических, химических и биохимических процессов, обусловленных смешением различных водных масс.

* *

У роботі наведено розрахунок стоку розчиненого та завислого заліза з Дніпровсько-Бузької гирлової області в Чорне море, зроблений на підставі даних багаторічних спостережень. Показано, що в міру просування водної маси від нижнього б'єфа Каховської ГЕС стік зазнає істотних змін у гирловій ділянці річок – Дніпровсько-Бузькому лимані. Середньорічна величина стоку $Fe_{розч.}$ і $Fe_{зав.}$ становить 3,56 і 91,98 тис. т. відповідно.

* *

1. *Алекин О.А.* Руководство по химическому анализу вод суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 270 с.
2. *Глаголева М.А.* Формы миграции элементов в речных водах // К познанию диагенеза осадков. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – С. 5-28.
3. *Гордеев В.В.* Речной сток в океан и черты его геохимии. – М.: Наука, 1983. – 160 с.

4. Гордеев В.В., Артемьев В.Е., Гурвич А.М., Митропольский А.Ю. Комплексные исследования в устьях рек бассейнов Черного, Азовского и Каспийского морей // Геол. журнал. – 1978, №3. – С. 130-132.
5. Денисова А.И. Формирование гидрохимического режима водохранилищ Днепра и методы его прогнозирования. – К.: Наук. думка, 1979. – 290 с.
6. Жукинский В.Н., Журавлева Л.А., Иванов А.И. и др. Днепровско-Бугская эстуарная экосистема. – К.: Наук. думка, 1989. – 240 с.
7. Журавлева Л.А. Гидрохимия устьевой области Днепра и Южного Буга в условиях зарегулированного водного стока. – К.: Наук. думка, 1988. – 176 с.
8. Зиминова Н.А., Трифонова Н.А., Григорьева Е.Р. Органическое вещество и биогенные элементы во взвесьях верхней Волги // Биол. продукционные процессы в бассейне Волги. – Л.: Наука, 1976. – С. 39-48.
9. Лисицын А.П. Осадкообразование в океанах. – М.: Наука, 1974. – 438 с.
10. Мокиевская В.В. К вопросу о геохимии железа в морской воде // Труды института океанологии. – 1959. – 33. – С. 114-125.
11. Степанова И.К. Определение железа во взвесьях // Информационный бюллетень ИБВВ. – 1976. – №32. – С. 68-71.
12. Holdberg E.D. Assimilation by Marine Diatoms // Biological Bulletin, 1952. – V. 102, № 2. – P. 243-248.
13. Harvey H.W. The supply of Iron to Diatoms // J. of the Marine Biological Association of the United Kingdom. – 1937 – V. 22. – P. 205-218.
14. Sholkovitz E.R. Flocculation of dissolved organic and inorganic matters during the mixing of river water and sea water. – Geochim.et.Cosmochim.acta. – 1976. – V. 40, № 7. – P. 831-845.

Институт гидробиологии НАН Украины, Киев