

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗА В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ БАССЕЙНА СРЕДНЕГО И НИЖНЕГО АМУРА

© 2012 г. С. И. Левшина

Институт водных и экологических проблем ДВО РАН

680000 Хабаровск, ул. Ким-Ю-Чена, 65

E-mail: levshina@ivep.as.khb.ru

Поступила в редакцию 11.10.2010 г.

Представлены новые результаты о содержании и распределении железа в растворе и взвеси в водах р. Амура и его крупных притоков (рек Буреи, Сунгари и др.), полученные в 2006–2009 гг. Выявлена неравномерность распределения железа по гидрологическим створам реки и вдоль Амура. Впервые оценены связи железа с гумусовыми кислотами в реках и озерах бассейна Среднего и Нижнего Приамурья.

Ключевые слова: железо, поверхностные воды, органическое вещество, гумусовые кислоты.

Железо (Fe) – один из наиболее распространенных биогенных элементов на Земле, участвующий в круговороте органического вещества (ОВ) биосферы [7, 12, 20]. Этот элемент необходим для высших водных растений, водорослей и многих других гидробионтов. Недостаток Fe лимитирует развитие фитопланктона в морских водах. Кроме того, оно оказывает большое влияние на миграцию P, Mn и других элементов (за счет сорбции их гидрооксидами железа). Высокое содержание Fe в поверхностных водах ухудшает органолептические свойства воды, вызывает дополнительные трудности в процессе водоподготовки.

Биогеохимическое поведение Fe и его воздействие на водные экосистемы определяется не только его общим содержанием, но и формами его нахождения в водной среде [2, 16]. Железо способно находиться в разных валентных состояниях, вступать в разнообразные взаимодействия с минеральными и органическими взвесьями, образовывать комплексы с растворенным ОВ, участвовать в процессах метаболизма железобактерий. Оценка количественного содержания Fe и форм его существования в поверхностных водах Приамурья, а также выноса его в Амурский лиман и далее в окраинные моря весьма важны при изучении биогеохимических процессов в водных экосистемах.

В бассейне Среднего и Нижнего Амура высоким содержанием Fe характеризуются горные породы, почвы, поверхностные и подземные воды [8, 9, 19, 23, 24]. Водосборная площадь бассейна Амура составляет 1.85 млн км² и занимает десятое место среди речных бассейнов мира. Величина водного стока Амура составляет 346 км³/год [18]. Низменные территории, обильные осадки и регу-

лярные паводки приводят к заболоченности обширных территорий. Амур несет свои воды в Амурский лиман и впадает сразу в два моря – Охотское (через Сахалинский зал.) и Японское (через Татарский прол.).

Имеется большой массив данных по содержанию Fe в поверхностных водах Приамурья [17, 24, 26–28]. Дальневосточным управлением гидрометслужбы (ДВ УГМС) в г. Хабаровске систематически проводятся наблюдения за содержанием в воде Амура растворенных форм Fe. Однако имеющиеся данные весьма противоречивы, так как они получены с использованием разных методик и для разных форм Fe. Основные погрешности обычно связаны с отбором проб и их консервацией (если анализ не проводится сразу) [25, 29]. Поэтому детальное исследование основных закономерностей пространственного распределения форм Fe в бассейне Амура весьма актуально.

Цель работы – оценить содержание и распределение форм Fe в водах среднего и нижнего течений Амура, его крупных притоков, припойменных озер и Амурского лимана. Значительное внимание в исследовании уделено комплексообразованию Fe с ОВ поверхностных вод, в частности с гумусовыми кислотами – гуминовыми и фульвокислотами.

РАЙОН РАБОТ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материал собран в ходе экспедиционных работ, проведенных Институтом водных и экологических проблем (ИВЭП) ДВО РАН в 2006–2008 гг. в рамках программы ДВО РАН “Комплексные экспедиционные исследования природной среды

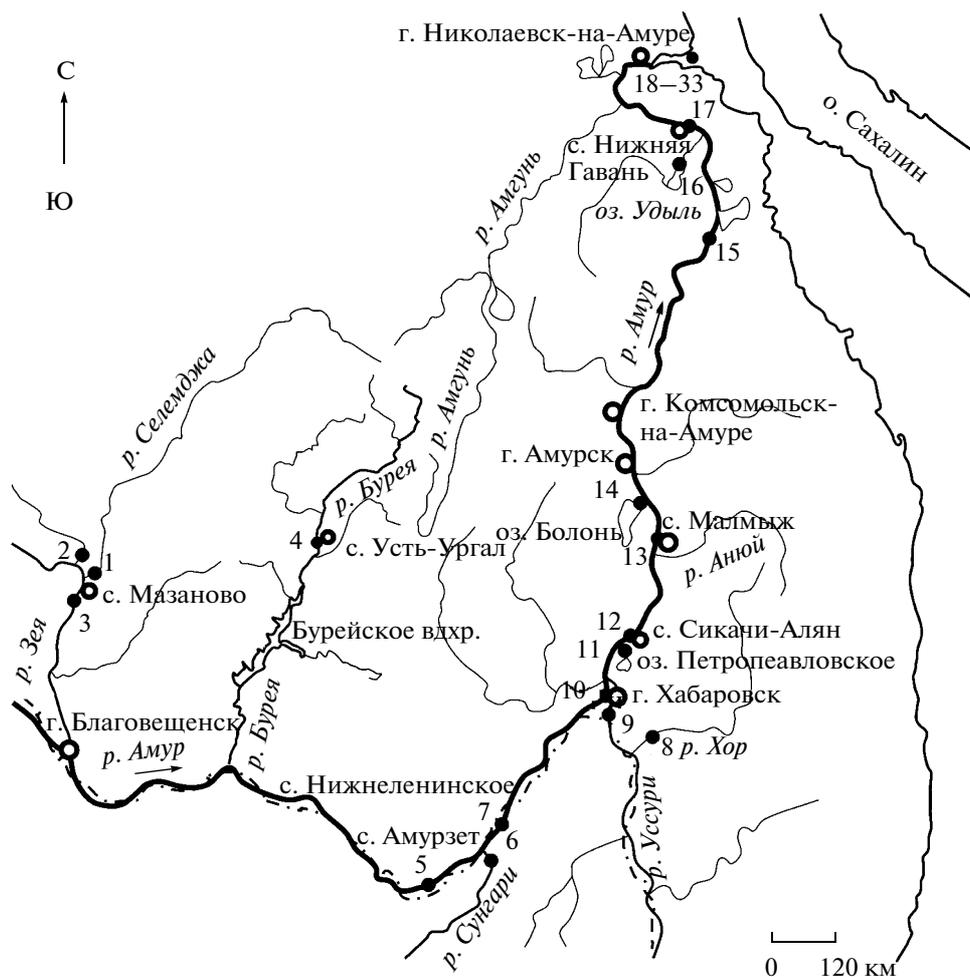


Рис. 1. Карта-схема расположения станций отбора проб воды.

в бассейне р. Амур (2004–2008)”, а также летом 2009 г.

На рис. 1 показано местоположение станций отбора проб воды, которые на реках отбирали объемом 2 л батометром из приповерхностных (глубина 0.5 м) и придонных (0.5 м от дна) горизонтов по гидрологическим створам, на озерах — в центре или в нескольких станциях с поверхности озера. В Амурском лимане отобрано 15 проб (станции 18–33). Наблюдения проводились осенью, зимой, весной и преимущественно летом. Работы в 2006–2008 и 2009 гг. проводились при низких и повышенных уровнях воды соответственно.

Подготовка проб к анализу проводилась в соответствии с методикой изучения пресных Fe-содержащих вод [25]. Содержание закисного Fe(II) и окисного Fe(III) железа в воде определяли фотометрическим методом с реактивом 2,2'-дипиридил непосредственно в полевых условиях (на судне) или в лаборатории после доставки в течение нескольких часов; содержание $Fe_{\text{общ}}$ опреде-

лялось тем же реактивом с фотометрическим окончанием после разрушения ОВ путем его окисления и прокалывания сухого остатка [25] или с использованием масс-спектрофотометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). Для определения растворенного и взвешенного Fe пробы фильтровали (под вакуумом) с использованием предварительно подготовленных ядерных фильтров с размером пор 0.45 мкм. Воды р. Сунзари фильтровали через фильтры с размером пор 0.45 и 0.2 мкм. Полученные фильтраты подкисляли HNO_3 до pH 2. Для определения форм углерода (C) отдельная проба фильтровалась через подготовленные стекловолкнистые фильтры марки GF/F Whatman. В летний период пробы фильтровали на судне сразу после отбора и хранили не более 2–4 сут. при температуре 2–5°C или замораживали и доставляли в лабораторию для анализа. Зимой и весной пробы в течение 1–2 сут доставлялись в лабораторию в контейнерах при температуре 0–5°C и фильтровались. В работе использовалась комплексная схема сбора и обра-

Таблица 1. Распределение ВВ в водах р. Амура и его крупных притоков и взвешенных форм Fe в июне 2007 г. (даны пределы содержания; в скобках – средние значения; под косой чертой – данные для воды, фильтрованной через фильтр 0.2 мкм; здесь и в табл. 2 *n* – количество проб)

Номер станции	Объект	<i>n</i>	Взвешенные формы Fe		ВВ
			мкг/дм ³	%	мг/дм ³
5	р. Амур, с. Амурзет	4	153–189 (171)	3.93–5.27 (4.48)	15.5–17.9 (17.7)
7	р. Амур, с. Нижнеленинское		468–2470 (1429)	2.87–4.12 (3.30)	22.3–113.0 (77.3)
6	р. Сунгари, 2 км выше устья*	6	7652/11733	3.29/5.05	368.0
9	р. Уссури, 7 км выше устья	1	413–893 (653)	4.21–4.90 (4.50)	15.4–22.8 (20.9)
17	р. Амур, с. Нижняя Гавань**	4	730–1150 (976)	4.10–4.31 (4.10)	31.4–42.9 (38.3)
	Реки мира [5, 30]		17600–23 500	5.1	30–460 и более

* Данные за июль 2009 г.

** Данные за сентябрь 2007 г.

ботки материала, включающая в себя методы мембранной фильтрации, ионообменной хроматографии и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (прибор Elan DRC II PerkinElmer, США). Fe во взвеси определяли методом ICP-MS после разложения фильтров со взвесью под воздействием сильных кислот. Для извлечения из воды форм Fe, связанных с гумусовыми кислотами, использовали метод концентрирования на диэтиламиноэтилцеллюлозе (ДЭАЭ-целлюлозе) [11].

В пробах определяли цветность, взвешенное вещество (**ВВ**), валовый, растворенный и взвешенный органический С ($C_{орг}$, C_p и C_v соответственно) стандартными методами химического анализа природных вод [1], гумусовые кислоты – ДЭАЭ-методом [11]. Попутно измеряли водородный показатель рН-метром марки рН-150МИ, соленость *S* морской воды – портативными приборами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение Fe в воде Амура значительно изменяется как вдоль течения реки, так и по гидрологическим створам и сильно зависит от поступления воды из его крупных притоков (табл. 1, 2). Как отмечается исследователями [5, 6, 30], основная масса Fe, переносимая речными водами, связана со взвесью (мигрирует во взвешенной, а не растворенной форме). На рис. 2 и в табл. 1 приведены данные по содержанию растворенных и взвешенных форм Fe в воде рек бассейна Амура (выше и ниже устья р. Сунгари, станции 5 и 7 соответственно) и Уссури (ст. 9), а также – количество ВВ. Высокое содержание растворенных форм Fe у левого берега Амура (с. Амурзет, ст. 5) не характерно для речных вод. Лишь реки, бассейны которых расположены на слаборасчленен-

ной местности, с повышенными годовыми температурами и низким содержанием ВВ в воде (несколько миллиграммов в 1 дм³) переносят Fe в растворенной форме [4]. Для левобережных притоков Амура (рек Зеи и особенно Буреи) характерно преобладание растворенного стока над взвешенным. Количество ВВ в водах упомянутых притоков невелико (~10 мг/дм³), причем в водах

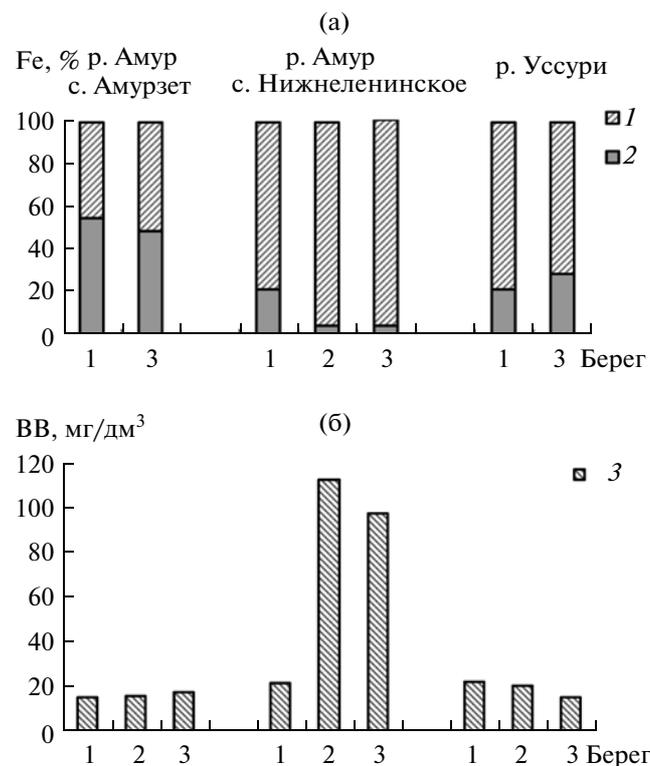


Рис. 2. Соотношение взвешенных (1), растворенных (2) форм железа (а) и содержание ВВ (3) (б) у левого (1), правого (3) берегов и на середине (2) рек Амура и Уссури.

Таблица 2. Распределение C_p и растворенных форм Fe в поверхностных водах рек Приамурья в 2006–2009 гг. (числитель – пределы содержания, знаменатель – среднее значение)

Дата отбора	n	рН	C_p	Гумусовые кислоты	Fe		
			Мг С/дм ³		растворенное	связанное с гумусовыми кислотами	
					мкг/дм ³	мкг/дм ³	% от растворенного Fe
р. Селемджа (ст. 1)							
19.09.2008 г.	1	6.71	18.0	4.85	786.9	350.1	44.5
р. Граматуха (ст. 2)о							
19.09.2008 г.	1	6.17	20.2	4.91	824.2	396.5	48.1
р. Зея (с. Мазаново, ст. 3)							
19.09.2008 г.	3	$\frac{6.78-6.90}{6.85}$	$\frac{21.7-28.5}{25.8}$	$\frac{4.40-4.86}{4.60}$	$\frac{227-272}{248}$	$\frac{86.7-131}{115}$	$\frac{38.2-53.2}{46.4}$
р. Буряя (с. Усть-Ургал, ст. 4)							
25.08.2006 г.	2	$\frac{6.65-6.74}{6.70}$	$\frac{7.5-8.0}{7.8}$	$\frac{4.23-4.46}{4.33}$	$\frac{380-410}{395}$	$\frac{294-346}{320}$	$\frac{76.6-84.4}{80.5}$
р. Амур (с. Амурзет, ст. 5)							
19.06.2007 г.	3	$\frac{6.52-7.47}{6.88}$	$\frac{8.8-9.1}{9.0}$	$\frac{4.88-5.20}{5.10}$	$\frac{153-188}{172}$	$\frac{51.8-125}{79.3}$	$\frac{34.1-66.3}{45.0}$
20.08.2007 г.	4	$\frac{6.70-7.03}{6.92}$	$\frac{10.5-11.1}{10.9}$	$\frac{4.45-4.87}{4.70}$	$\frac{191-220}{204}$	$\frac{82.5-190}{135}$	$\frac{43.4-86.5}{65.3}$
27.02.2008 г.	5	$\frac{6.65-6.70}{6.68}$	$\frac{8.5-9.9}{9.2}$	$\frac{4.42-4.87}{4.69}$	$\frac{100-345}{212}$	$\frac{72.8-170}{125}$	$\frac{50.0-72.8}{63.6}$
06.06.2008 г.	5	$\frac{6.90-7.10}{7.00}$	$\frac{10.4-13.6}{11.7}$	$\frac{3.01-3.41}{3.17}$	$\frac{148-201}{167}$	$\frac{58.0-82.4}{66.8}$	$\frac{28.9-54.9}{43.2}$
р. Сунгари (2 км выше устья, ст. 6)							
20.07.2009 г.	1	8.09	10.0	1.50	1145	10.2	1.6
20.07.2009 г.*	1	8.09	9.1	0.90	<0.001	<0.001	нет
р. Амур (с. Нижнеленинское, ст. 7)							
21.06.2007 г.	3	$\frac{6.55-6.63}{6.53}$	$\frac{9.5-12.5}{11.0}$	$\frac{1.61-3.43}{2.24}$	$\frac{61.2-131}{92.6}$	$\frac{<0.001-72.6}{30.1}$	$\frac{<0.001-42.7}{26.3}$
21.08.2007 г.	5	$\frac{6.70-7.63}{7.13}$	$\frac{10.1-12.1}{11.3}$	$\frac{2.18-4.80}{3.20}$	$\frac{227.6-560.1}{312}$	<0.001–152	<0.001–73.4
29.02.2008 г.	5	$\frac{6.61-6.89}{6.77}$	$\frac{8.1-9.4}{8.5}$	$\frac{1.53-4.51}{2.60}$	$\frac{54.4-224}{126}$	$\frac{<0.001-162}{105}$	$\frac{<0.001-72.0}{55.3}$
09.06.2008 г.	4	$\frac{7.20-7.81}{7.60}$	$\frac{11.2-12.8}{12.2}$	$\frac{1.92-3.13}{2.63}$	$\frac{201-691}{501}$	$\frac{20.3-78.8}{58.3}$	$\frac{3.30-38.1}{17.6}$
р. Хор (ст. 8)							
23.07.2007 г.	2	7.25	3.2	1.35	25–31	<0.001–4.2	<0.001–14.2
р. Усури (7 км выше устья, ст. 9)							
23.06.2007 г.	3	$\frac{7.59-7.67}{7.61}$	$\frac{6.8-9.2}{7.7}$	$\frac{2.15-3.0}{2.60}$	$\frac{281-566}{430}$	$\frac{70.3-76.5}{74.1}$	$\frac{13.3-27.3}{18.8}$
03.03.2008 г.	3	$\frac{7.02-7.05}{7.03}$	$\frac{4.0-5.7}{4.7}$	$\frac{1.65-2.05}{1.80}$	$\frac{64.7-85.3}{74.8}$	$\frac{21.6-24.2}{22.9}$	$\frac{28.2-32.8}{30.5}$
10.06.2008 г.	3	$\frac{7.26-7.54}{7.36}$	$\frac{7.2-9.2}{8.4}$	$\frac{2.13-2.16}{2.16}$	$\frac{136-247}{204}$	$\frac{39.0-45.1}{42.0}$	$\frac{17.0-31.0}{22.0}$

Таблица 2. Окончание

Дата отбора	n	рН	C _p	Гумусовые кислоты	Fe		
			Мг С/дм ³		растворенное	связанное с гумусовыми кислотами	
					мкг/дм ³	мкг/дм ³	% от растворенного Fe
оз. Петропавловское (ст. 11)							
12.09.2007 г.	3	$\frac{6.01-6.59}{6.30}$	$\frac{7.0-12.3}{9.4}$	$\frac{4.15-4.22}{4.20}$	$\frac{317-557}{328}$	$\frac{<0.001-69.5}{53.8}$	$\frac{<0.001-12.4}{12.1}$
оз. Болонь (ст. 14)							
14.09.2007 г.	3	$\frac{6.94-7.25}{7.13}$	$\frac{7.2-8.6}{7.8}$	$\frac{4.41-4.71}{4.56}$	$\frac{412-455}{434}$	$\frac{249-256}{253}$	$\frac{56.3-60.4}{58.4}$
оз. Удыль (ст. 16)							
20.09.2007 г.	2	$\frac{6.82-6.91}{6.82-6.91}$	$\frac{12.0-12.2}{12.0-12.2}$	$\frac{5.45-5.60}{5.45-5.60}$	$\frac{549-587}{549-587}$	$\frac{351-389}{351-389}$	$\frac{63.9-66.2}{63.9-66.2}$
р. Амур (с. Нижняя Гавань, ст. 17)							
20.09.2007 г.	4	$\frac{7.20-7.29}{7.26}$	$\frac{7.2-8.1}{7.5}$	$\frac{3.15-3.42}{3.24}$	$\frac{150-224}{187}$	$\frac{64.2-75.1}{70.0}$	$\frac{32.3-42.8}{38.0}$

* Данные для воды, фильтрованной через фильтр 0.20 мкм.

Буреи оно минимальное (C_в – 0.5 мг С/дм³). Из табл. 2 видно, что содержание растворенного Fe как в Амуре, так и в его крупных левых притоках составляет 0.2–0.5 мг/дм³, что превышает рыбохозяйственные ПДК в 2–5 раз [21]. Лишь в водах Усури содержание растворенного Fe несколько ниже (0.07–0.43 мг/дм³). Среднее содержание растворенного Fe в реках мира составляет 0.066 мг/дм³ [31, 32].

Высокое содержание Fe в водотоках бассейна Амура обусловлено несколькими причинами. Одна из них – повсеместное присутствие здесь горных пород (базальтов, андезито-базальтов, андезитов), богатых железистыми минералами, и железорудных месторождений (табл. 3). Например, в конце 2009 г. началось строительство горно-обогатительного комбината по производству железорудного концентрата на Кимканском и Сутарском железорудных месторождениях (в районе ст. Известковой). В тех или иных количествах и формах Fe постоянно присутствует во всех аккумулятивных образованиях в долинах рек и почвенном покрове гор бассейна Амура. Кроме того, на отдельных заболоченных участках четко выявляется присутствие железомарганцевых пленок и конкреции [10, 23].

Высвобождаясь из кристаллических решеток первичных минералов, Fe вступает в химические реакции и в форме различных соединений вовлекается в геологический и биологический круговороты. Основные факторы, влияющие на геохимическую подвижность Fe в почвах и поверхностных водах, – реакция среды, окислительно-восстановительный потенциал, гидротермиче-

ский фактор и условия разложения ОВ [5, 8, 10]. Основные формы миграции Fe – истинные растворы простых солей, коллоидные растворы железоорганических соединений, в составе ВВ и сорбированное на взвешях [20]. Часть Fe поступает в растворы и активно мигрирует в почвах и ландшафтах Приамурья, что подтверждается высоким содержанием его в подземных водах – до 20 мг/дм³ и выше [13, 24].

Высокую подвижность Fe в бассейне Амура исследователи традиционно связывают с формированием кислого (фульватного) гумуса в горнотаежных почвенно-геохимических областях и с болотным почвообразованием [8, 10]. В ландшафтах, богатых современными органогенными отложениями, интенсивность миграции Fe в поверхностных водах достаточно велика – его коэффициент водной миграции K_{Fe} = 2.8. (Миграци-

Таблица 3. Валовое содержание Fe в горных породах Приамурья

Объект исследования	Fe, %	Источник
Граниты	2.51	[22]
Диориты	7.93	[22]
Базальты	11.49	[22]
Андезито-базальты	10.10	[22]
Суглинисто-глинистые отложения поймы	4.21	[8–10]
Песчаные отложения поймы	2.05	[8–10]
Кларк в земной коре	4.65	[3]

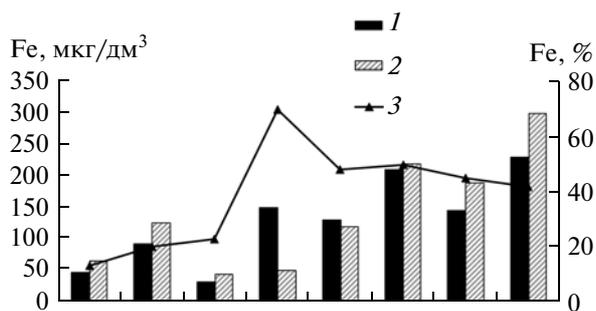


Рис. 3. Среднее содержание Fe(II) (1), Fe(III) (2) и доля (Fe(II)+Fe(III)) в общем содержании Fe (3) в речных водах Приамурья. Дата отбора и количество проб для рек Зеи, Селемджи, Граматухи, Хора и Амура (ст. 17) – табл. 2. Воды р. Амура отбирали у сел Сикачи-Аля и Малмыж 16 и 18 июня 2006 г. соответственно, на ст. 15 – отбирали 18 сентября 2007 г. Количество проб – 5 на каждом створе.

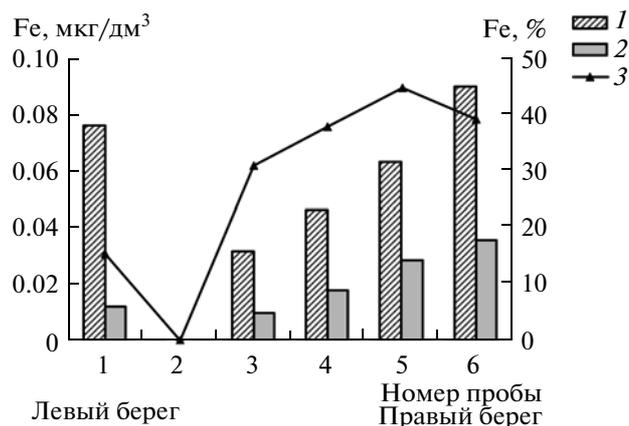


Рис. 4. Распределение Fe в растворенной форме (1), связанного с гумусовыми кислотами (2) и доля гуматов Fe (3) в содержании общего растворенного Fe по поперечному сечению р. Амура в январе 2009 г. на ст. 10.

онная способность марганца, для сравнения, намного ниже – 0.25–1.0) [26].

Большая часть растворенного Fe в водах Амура в районе ст. 3 присутствует в форме комплексных (хелатных) соединений (до 60% и более), которые поставляются с водами его крупных левобережных притоков – Зеи и особенно Буреи (табл. 2). В данном случае устойчивость хелатированного Fe значительно возрастает и не ограничивается теми кислотно-основными и окислительно-восстановительными условиями, в которых могли бы находиться в растворе ионные формы Fe. Условия миграции Fe в реках Нижнего Приамурья (главным образом, в Амуре) характеризуются низкой минерализацией вод, слабокислой и нейтральной реакцией среды, повышенной окисляемостью вод [17]. О высоком содержании в водах Амура гумусовых веществ свидетельствуют данные, полученные автором в предыдущие годы [14, 15].

В водах Амура ниже устья Сунгари (ст. 7) содержание Fe в растворенной и взвешенной формах изменялось в широком диапазоне. Содержание в воде взвешенных форм Fe (по отношению к сумме взвешенного и растворенного) изменялась по гидрологическому створу реки от 78.7 до 98% с максимумом у правого берега. Существенное влияние на качество воды Амура оказывают воды Сунгари, которые удалось проанализировать летом 2009 г. Сток Сунгари составляет в среднем 25% общего стока Амура. Воды Сунгари после фильтрации через фильтр с размером пор 0.20 мкм не содержали в своем составе растворенных форм Fe; оно найдено во взвешенной форме в количестве 11.7 мг/дм³, или 5.1% (в расчете на сухую взвесь). После фильтрации вод Сунгари через фильтр с размером пор 0.45 мкм содержание валового растворенного Fe достаточно высокое

(1.14 мг/дм³). Также определены гуматы Fe – в минимальных количествах (~1.5%). Для вод Сунгари характерно высокое содержание ВВ, в составе которых велика доля тонкодисперсной глинистой фракции, обладающей высокой сорбционной емкостью.

Характер распределения ионных форм Fe в водах Амура и некоторых его притоков представлен на рис. 3. Для вод Амура характерно наличие соединений Fe(II), но преимущественно оно находилось в форме Fe(III). Ионные формы железа (Fe(II) + Fe(III)) в воде составляют 45–50% его общего содержания. В водах Зеи и ее левобережных притоков (Селемджи и Граматухи) Fe находилось в виде ионов в небольшом количестве (11–23%), а большая его часть – в виде комплексов с гумусовыми веществами (в среднем ~50%). В воде р. Хор, бассейн которой расположен на западном склоне Сихотэ-Алиня, Fe находится преимущественно в свободном состоянии (в виде двухвалентных ионов, не связанных с органическими компонентами).

Зимой с понижением температуры, замедлением (или вообще остановкой) химических реакций и уменьшением водного стока рек происходит значительное сокращение выноса речным стоком ОВ. Для вод Амура его количество весьма значительно особенно ниже устья Сунгари – от правого берега до середины реки. Содержание растворенного Fe в воде Амура в зимний период оценено авторами как по продольному профилю реки (от с. Амурзет до г. Хабаровска), так и по поперечному сечению в районе г. Хабаровска (ст. 10 – табл. 2, рис. 4). Количество растворенного Fe в воде Амура зимой оставалось весьма существенным, а динамика распределения повторяла летний период и значительно изменялась по гидро-

логическому створу реки как ниже устья Сунгари, так и в районе Хабаровска. У правого берега четко прослеживается влияние стока р. Усури, у левого — Буреи и Зеи, а ближе к середине (проба 2) — Сунгари (рис. 4). Содержание растворенного Fe в воде изменялось от <0.001 до 0.090 мг/дм³, доля закомплексованного Fe — от нулевых отметок до 45%. Полученные данные хорошо коррелировали с цветностью воды ($r = 0.97$), которая составляла 65–110 град Pt-Co шкалы, ее распределение по створу аналогично распределению растворенного Fe в воде. Значения $C_{орг}$ в воде при этом составляли 10.2–16.8 мг C/дм³ (максимальная величина зафиксирована на вертикали 2).

В водах крупных озер Болонь (ст. 14), Удыль (ст. 16), сток которых в Амур составляет ~8% от стока Амура, преобладают растворенные формы Fe — это результат значительного притока растворенных железоорганических соединений с болотных водосборов. Здесь широко распространены таежные почвы с преобладанием в их профиле гумусово- и железисто-иллювиальных процессов, поэтому в воде этих озер преобладает Fe в растворенной форме — доля гуматов составляет 58–66% (табл. 2). Кроме того, в эти озера постоянно выносятся воды с больших массивов торфяных верховых болот, содержащих высокие концентрации подвижного Fe [24]. Особенно сильно заторфована котловина оз. Удыль. В отличие от указанных двух озер в водах оз. Петропавловского (ст. 11) преобладают взвешенные формы Fe (98%) [17]. Для данного озера большое значение имеет вклад поверхностного стока с распаханых и мелиорированных почв сельскохозяйственных угодий и сточных вод с городской территории. Длительный период высоких летних температур и мелководность этого озера обуславливают его высокое евтрофирование, что, в свою очередь, приводит к повышенному содержанию взвешенных форм Fe в составе живого и отмершего ОВ.

По мере движения к лиману (ст. 17) происходит незначительное снижение содержания общего Fe в воде Амура, прежде всего, за счет растворенной его формы. Это происходит, по-видимому, за счет снижения содержания гуматов Fe в растворенной форме (40–43%). Даже в этих условиях в водах Амура содержание Fe выше, чем в р. Усури, что, очевидно, также объясняется снижением количества гуминовых кислот, связывающих Fe в водах этого крупного правого притока (табл. 3).

При выносе вод Амура в Амурский лиман (станции 18–33) на разных стадиях перемешивания пресных и соленых вод происходит не прямое разбавление, а процесс преобразования растворенного ОВ в ВВ, а также обратный процесс (адсорбционно-десорбционные взаимодействия, флокуляция, биогеохимические превращения). При сме-

не окислительно-восстановительной обстановки при S , составляющей 3–10‰, происходит быстрое разрушение органических комплексов Fe и, вероятно, его осаждение в виде гидроксидов. Количество гумусовых кислот в воде снижается от 3.31 до 0.38 мг C/дм³. При этом количество связанного в комплексы Fe также резко уменьшается — на порядок и более (от 70 до 9 мкг/дм³).

ВЫВОДЫ

Содержание растворенных и взвешенных форм Fe в водах Амура изменяется в широких диапазонах как вдоль реки, так и по ее гидрологическим створам. Перенос Fe в составе взвесей резко преобладает над его переносом в растворенной форме особенно ниже устья Сунгари. Воды Сунгари переносят Fe во взвешенной форме (до 98% и более), гуматы Fe в составе растворенного ОВ практически отсутствуют.

В воде рек Зеи и особенно Буреи существенно увеличивается количество Fe в растворенной форме, доля Fe в комплексах с ОВ достигает 46 и 80% соответственно, а содержание ионных форм в водах Зеи и ее притоков незначительно — 13–23% общего содержания Fe. Водам Амура присущи закисные (Fe(II)), но преимущественно ионные (Fe(III)) формы (~45% общего его содержания), существенна доля и гуматов Fe (до 45% растворенного Fe).

Исследуемые озера характеризовались неоднородностью распределения растворенных и взвешенных форм Fe. В воде оз. Петропавловского Fe преобладает в составе взвесей (до 98%), оз. Болонь и Удыль — в растворенной форме с высокой долей гуматов Fe (до 60–80%), что связано с условиями почвообразования на их водосборах и внутриводоемными процессами.

Большая часть Fe, мигрирующего в составе растворенного ОВ, осаждается при смешении пресных и соленых вод, задерживается в Амурском лимане и не попадает в прибрежные акватории Охотского и Японского морей.

Автор выражает благодарность Е.Г. Ивановой (ДВ УГМС) за помощь в сборе полевого материала, Д.А. Некрасову (ИБМ ДВО РАН) и В.М. Шулькину (ТИГ ДВО РАН) — за помощь при отборе проб морской воды и предоставление данных об их солености, сотрудникам ИВЭП ДВО РАН — за помощь в проведении экспедиционных работ и Н.К. Христофоровой — за участие в обсуждении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алевкин О.А., Семенов А.Д., Скопинцев Б.А. Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 266 с.

2. *Варшал Г.М., Кощеева И.Я., Сироткина И.С. и др.* Изучение органических поверхностных вод и их взаимодействие с ионами металлов // *Геохимия*. 1979. № 4. С. 598–607.
3. *Виноградов А.П.* Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // *Геохимия*. 1962. № 7. С. 555–571.
4. *Волков И.И.* Химические элементы в речном стоке и формы их поступления в море (на примере рек Черноморского бассейна) // *Проблемы литологии и геохимии осадочных пород и руд*. М.: Наука, 1975. 85–113.
5. *Гордеев В.В.* Речной сток в океан и черты его геохимии. М.: Наука, 1983. 160 с.
6. *Гордеев В.В., Лисицын А.П.* Средний химический состав взвесей рек Мира и питание океанов речным осадочным материалом // *Докл. АН СССР*. 1978. Т. 238. № 1. С. 225–228.
7. *Добровольский В.В.* Геохимическое землеведение. М.: ВЛАДОС, 2008. 207 с.
8. *Ершов Ю.И.* Новообразования железа в долинах рек нижнего Приамурья // *Природные воды Дальнего Востока / Вопросы географии Дальнего Востока*. Хабаровск: Хабаровский комплексный НИИ, 1975. Сб. 15. С. 155–167.
9. *Зимовец Б.А.* Почвенно-геохимические процессы муссонно-мерзлотных ландшафтов. М.: Наука, 1967. 166 с.
10. *Иванов Г.И.* Почвообразование на юге Дальнего Востока. М.: Наука, 1976. 200 с.
11. *Красюков В.Н., Лапин И.А.* Способ определения гумусовых веществ в природных водах. А.с. 1385041. БИ. 1988. № 12. С. 175.
12. *Ковда В.А.* Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 263 с.
13. *Кулаков В.В.* Месторождения пресных подземных вод Приамурья. Владивосток: ДВО РАН СССР, 1990. 161 с.
14. *Левшина С. И.* Гумусовые кислоты в речных водах Приамурья // *География и природ. ресурсы*. 2006. № 2. С. 101–105.
15. *Левшина С.И.* Растворенное и взвешенное органическое вещество вод Амура и Сунгари // *Вод. ресурсы*. 2008. Т. 35. № 6. С. 745–753.
16. *Линник П.Н., Набиванец Б.И.* Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 268 с.
17. *Матюшкина Л.А., Левшина С.И., Юрьев Д.Н.* Железо в почвах и поверхностных водах Нижнего Приамурья // *Биогеохимические и экологические исследования наземных и водных экосистем*. Владивосток, 2006. Вып. 16. С. 185–194.
18. *Николаева Г.М., Черногаева Г.М.* Водный баланс Азии. М.: Сов. радио, 1977. 113 с.
19. *Никольская В.В.* Морфоскульптура бассейна Амура. М.: Наука, 1972. 295 с.
20. *Перельман А.И.* Геохимия эпигенетических процессов (зона гипергенеза) М.: Недра, 1968. 331 с.
21. Перечень рыбохозяйственных нормативов: предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М.: ВНИРО, 1999. 303 с.
22. *Попкова М.И., Кайдалова Е.Ф., Климовская Г.В., Саврасов Н.П.* Сборник химических анализов изверженных горных пород южной части Дальнего Востока. Хабаровск: Хабаровское кн. изд-во, 1961. 700 с.
23. *Росликова В.В.* Марганцево-железистые новообразования в почвах равнинных ландшафтов гумидной зоны. Владивосток: Дальнаука, 1996. 291 с.
24. *Труфанов А.И.* О миграции железа и марганца в зоне гипергенеза юга Дальнего Востока // *Природные воды Дальнего Востока / Вопросы географии Дальнего Востока*. Хабаровск: Хабаровский комплексный НИИ, 1975. Сб. 15. С. 147–154.
25. *Труфанов А.И.* Рекомендации по унификации методов исследования пресных железистых вод. Хабаровск: Хабаровский комплексный НИИ, 1980. 56 с.
26. *Труфанов А.И., Коробий Э.Н.* О миграции железа и микроэлементов в природных водах Среднеамурской впадины // *Природные воды Дальнего Востока / Вопросы географии Дальнего Востока*. Хабаровск: Хабаровский комплексный НИИ, 1973. Сб. 13. С. 106–119.
27. *Чудаева В.А.* Миграция химических элементов в водах Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2002. 392 с.
28. *Шулькин В.М., Богданова Н.Н., Киселев В.И.* Металлы в речных водах Приморского края. Геохимия. 2007. № 1. С. 79–88.
29. *Benoit G., Hunter K.S., Rozan T.F.* Sources of trace metal contamination artifacts during collection, handing, and analysis of freshwaters // *Anal. Chem.* 1997. V. 69. P. 1006–1011.
30. *Gaillardet J., Viers J., Duprer B.* Trace elements in river waters // *The Treatise on Geochemistry / Eds. Drever J.I., Holland H.D., Turekian K.K.* 2004. V. 5. Oxford: Elsevier-Pergamon, 2004. Ch. 5.09. P. 225–272.
31. *Martin J.M., Guan D.M., Elbaz-Poulichet F. et al.* Preliminary assessment of the distributions of some trace elements (As, Cd, Cu, Fe, Ni, Pb and Zn) in a pristine aquatic environment: the Lena River estuary (Russia) // *Mar. Chem.* 1993. V. 43. P. 185–199.
32. *Shiller A.M.* Dissolved trace elements in the Mississippi river: Seasonal, interannual, and decadal variability // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1997. V. 61. № 20. P. 4321–4330.