

ГЕОХИМИЯ ВЗВЕСИ В ВОДАХ АМАЗОНКИ

© 2019 г. Г. Н. Батурина^{а,*}, В. В. Гордеев^{а,**}

^а Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
Россия, 117997 Москва, Нахимовский проспект, 36
e-mail: *galibatur@list.ru; ** gord_vv@mail.ru

Поступила в редакцию 22.10.2017 г.

После доработки 18.12.2017 г.

Принята к публикации 15.01.2018 г.

Исследование дубликатов проб взвешенного вещества из вод Амазонки, собранного в 9-м рейсе научно-исследовательского судна «Профессор Штокман», выполнено с применением современных аналитических методов. Воды бассейна Амазонки разделяются на три основных типа, отличающихся концентрацией взвешенного вещества и химическим составом: белые (мутные желтые воды собственно Амазонки и притока Мадейры), чистые (прозрачные воды крупных притоков Шингу, Тапажос, Тромбетас, Токантинс) и черные (цвета крепкого кофе с высоким содержанием растворенной органики и повышенной кислотностью — Риу-Негру). Выявлены специфические особенности состава взвешенного материала из различных участков речного бассейна. Установлено, что содержание и соотношение макро- и микроэлементов во взвеси варьируют в значительных пределах, но в целом валовый состав взвеси близок к среднемировому уровню для речных взвесей и глинистых пород, за исключением нескольких проб взвеси из чистых вод. Взвеси из белых и чистых вод (пробы из черных вод, к сожалению, не сохранились) оказались в той, или иной мере обогащены ртутью. Литературные данные свидетельствуют о том, что многие десятилетия в бассейне Амазонки ведется кустарная добыча золота с применением ртути (методом амальгамации), т.е. причина обогащения взвеси связана почти определенно с антропогенным фактором. В то же время значительное (до двух порядков величины) обогащение взвеси притоков Амазонки с чистой водой Шингу и Токантинса оловом, цинком, свинцом и в меньшей мере медью, кадмием, серебром и рядом других металлов дает основание полагать, что в регионах обогащения существует рудная минерализация.

Ключевые слова: геохимия, реки мира, взвесь, микроэлементы, воды Амазонки

DOI: 10.31857/S0016-7525642195-205

ВВЕДЕНИЕ

Взвешенный материал, поступающий в реки с дренируемых пород и почв, является основным источником терригенных осадков в морях и океанах, что важно для оценки роли рек в осадочном процессе. В связи с этим объем и состав речного стока давно используется океанологами, морскими геологами и геохимиками для балансовых расчетов вещества в системе континент-океан (Лисицын, 1974).

Для получения необходимых для рассмотрения этого вопроса данных седиментологии и геохимии принимали участие в речных экспедициях для конкретной оценки объема и состава терригенного (а иногда и антропогенного) материала, поступающего в моря и океаны. При этом наибольший интерес представляют крупные реки, в том числе величайшая из них — Амазонка. По современным данным, площадь водо-

сбора Амазонки составляет 6.3 млн км², длина реки — 6400 км, сток воды — 6300 км³/год, сток взвеси — 1200 млн т/год (Milliman, Farmsworth, 2011). Исследование взвеси в водах Амазонки было начато в конце прошлого века Р. Гиббсом (Gibbs, 1967; 1976; 1977), а затем продолжено рядом других геохимиков (Bouchez et al., 2010; Boyle et al., 1982; Edmond et al., 1981; Elbaz-Poulichet et al., 1999; Gaillardet et al., 1997; Martin, Meybeck, 1979; Sayler, Boaventura, 2003; Sholkovitz, Price, 1980; Sholkovitz, Szymczak, 2000; Sioli, 1950). Морские геологи Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН начали изучать эту проблему на примере рек России (Батурина, 1968; Батурина, Коченов, 1969; Гордеев, 1981, 1983, 2012; Гордеев, Орешкин, 1990; Морозов и др., 1974; Тримонис и др., 1987), но Амазонка, взвеси которой входят в состав осадков значительной части Атлантического океана, представляет для океанологии особый интерес. Идея организации

специальной экспедиции в бассейн этой реки была активно поддержана директором Института океанологии РАН того времени А.С. Мониним. В начале 1983 г. научно-исследовательское судно «Профессор Штокман» (9-й рейс) отправилось в первую советскую океанологическую экспедицию в бассейн Амазонки.

Полученные в экспедиции научные результаты, относящиеся к геологическим и геохимическим аспектам, основывались на аналитических данных, которые в целом уступали современному уровню по точности и диапазону исследованных химических элементов, что побудило нас возобновить это исследование на новой аналитической базе.

Особый интерес представляет поведение микроэлементов, о которых ранее были приведены неполные сведения в работах (Bouchez et al., 2010; Gaillardet et al., 1997; Malm, Castro, 1995; Martin, Meybeck, 1979; Martinelli et al., 1988; Saylor, Boaventura, 2003; Sholkovitz, 1993; Sholkovitz, Price, 1980; Sholkovitz, Szymczak, 2000, Veiga et al., 1999). Большое внимание исследователями Амазонки уделялось загрязнению акватории реки ртутью, о чем впервые было сообщено в 1978 г. в работе (Harada, 1978) и затем многократно подтверждено в разных частях бассейна (Harada, 1978; Lacerda, 1995; Lacerda et al., 1990; Martinelli et al., 1988; Veiga et al., 1999; Vital, Statteger, 2000).

Цель настоящей работы состоит в значительном расширении количества исследуемых элементов и уточнении их содержаний в сохранившихся пробах взвеси реки Амазонки и некоторых

ее притоков с белой и чистой водой с применением современной недоступной ранее аналитической аппаратуры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пробы взвеси из вод Амазонки были собраны в марте-апреле 1983 г. в разных частях бассейна Амазонки, включая основное русло и некоторые из важнейших притоков, таких как Токантинс, Тромбетас, Шингу, Тапажос, Мадейра, Риу-Негру (рис. 1). Воду отбирали пластмассовыми батометрами объемом 7 л. Пробы взвеси получали методами фильтрации, сепарации и отстоя. Для фильтрации использовали ядерные фильтры с размером пор 0.4 мкм. Среднее содержание взвеси колебалось от первых мг/л в водах притоков Амазонки Риу-Негру, Шингу, Токантинс и Тапажос до 300 мг/л в водах основного русла и правого притока Мадейры (Тримонис и др., 1987).

Первые после окончания экспедиции определения содержаний макроэлементов выполнены традиционными химическими методами, а микроэлементов — атомно-абсорбционным методом в Лаборатории физико-геологических исследований (ЛФГИ ИО РАН) и в лабораториях других институтов, например в ГЕОХИ им. А.П. Виноградова (нейтронно-активационным методом) и Институте почвоведения РАН (непламенной атомной абсорбцией) (Гордеев, Орешкин, 1990; Gordeev et al., 1985).

В данной работе рассматриваются новые результаты анализа большой группы химических

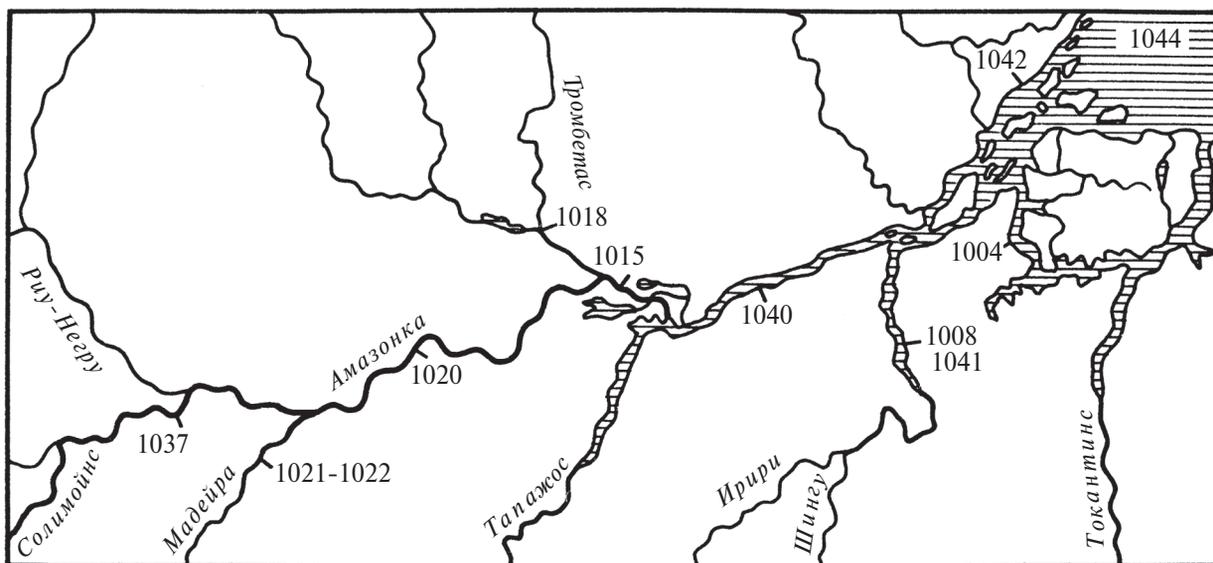


Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб; масштаб 1 : 10 000 000.

элементов в 19 пробах взвеси, сохранившихся после завершения экспедиции в 80-х годах прошлого века. Места взятия проб показаны на рис. 1. Пробы взвеси хранились в высушенном виде в полиэтиленовых пакетах и закрытых пластиковых флаконах в хранилище образцов.

Анализы были выполнены методом ИСП-МС в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН. Среднеквадратичная ошибка определения элементов не превышает 10–15%, если концентрация в пробе превышает в 5 раз предел обнаружения, и возрастает до 30% при более низких концентрациях (Карандашев и др., 2016).

Определение содержаний углерода и кремнезема, алюминия и фосфора выполняли в ЛФГИ ИО РАН на анализаторе углерода АН-7529М и фотометрическим методом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основной состав взвеси

Многообразные воды бассейна Амазонки разделяются на три основных типа — белые, чистые и черные (Sioli, 1950; Wallace, 1889). Разные типы вод легко различаются по цвету, который определяется в первую очередь мутностью, содержанием и качеством растворенной органики и отчасти химическим составом. Так называемые белые воды — это мутные (концентрация взвеси до 300–350 мг/л) глинисто-желтые воды самой Амазонки и крупнейшего южного притока Мадейры. Чистыми называют воды более прозрачные (5–20 мг/л взвеси), обычно синевато-зеленого цвета, как крупных притоков Амазонки с расширенными устьями — озерами, так и малых рек. Черные воды (крупнейшая река с этим типом вод — Риу-Негру) напоминают по цвету кофе или крепкий чай, довольно прозрачны (1–10 мг/л взвеси) и отличаются высокой кислотностью (рН около 4–5). Отметим, что такое разделение на типы вод Амазонии было подтверждено результатами гидрооптических измерений в рейсе (Монин, Копелевич, 1983).

Результаты определения основного состава взвеси представлены в табл. 1 и на рис. 2. Отдельно рассматриваются белые и чистые воды. Содержание большинства макроэлементов во взвеси как белых, так и чистых вод колеблется в довольно узких пределах, за исключением более изменчивых содержаний фосфатов в чистых водах (0.15–0.56 мас.%) и особенно

органического углерода также в чистых водах (1.03–8.51 мас.%). В первую очередь это связано с низкой мутностью чистых вод (почти всегда содержание $C_{\text{орг}}$ в речной взвеси находится в обратной зависимости от концентрации взвеси) (Meuback, 1982). Сопоставление средних содержаний макроэлементов во взвесах Амазонки, взвесах рек мира (Гордеев, 1983, 2012; Морозов и др., 1974) и глинистых осадочных породах (Григорьев, 2003) показывает, что эти три категории близки по содержанию кремнезема, алюминия, титана, железа и марганца. Взвеси Амазонки при этом существенно обеднены натрием, кальцием, магнием и серой. В отличие от взвеси чистых вод взвеси Амазонки и Мадейры не показывают существенного превышения P_2O_5 и $C_{\text{орг}}$ над взвесью рек мира.

Микроэлементный состав взвеси

Содержания микроэлементов во взвеси (табл. 2, рис. 2) колеблются в широком диапазоне — от сотых долей до нескольких сотен мкг/г. Обращает на себя внимание большое сходство химического состава взвеси рек с белой водой и составом взвеси рек мира и глинистых осадочных пород. Незначительные отклонения в обе стороны от содержаний во взвеси рек мира отмечаются для ряда элементов, в частности для Ag и Cd, содержания которых несколько ниже в амазонской взвеси, и Sn, Pb, Li и Zn, немного обогащающих взвесь Амазонки. Столь незначительные отклонения для сильно рассеянных элементов нельзя признать значимыми. И только Hg обогащает взвесь белых вод почти в 7 раз, что, как будет показано ниже, связано с антропогенным характером такого обогащения.

Иная картина наблюдается во взвеси чистых вод. Несколько ниже средних содержаний во взвеси рек мира оказываются некоторые литогенные элементы (Zr, V, Hf, Sc) и некоторые щелочно-земельные элементы (Sr, Rb, Cs). Но явно выделяется группа металлов, резко обогащающая взвесь чистых вод: это Hg, Sn, Zn, Pb. Их средние содержания во взвеси чистых вод Амазонии превышают глобальный фон речных взвесей (от 5 для Zn до 34 раз для Sn), а максимальные из измеренных превышают фон на два порядка величины (для олова 105 раз). Ради справедливости следует подчеркнуть, что в данной работе у нас было всего 4 пробы такой взвеси, из которых выделялись три (проба взвеси из вод Шингу мало отличалась от состава взвеси белых вод).

Таблица 1. Основной состав взвеси, мас. %

Компонент	№№ станций												Взвесь Амазонки						Реки мира	Глинистые породы	
	Число проб												Белые воды								Чистые воды
	1004	1008	1015	1018	1020	1021	1022	1037	1040	1041	1042	1044	I	II	III	IV	V	I			
SiO ₂	52.0	46.5	63.0	-	58.1	54.2	-	51.9	61.5	66.9	34.0	57.8	53.5	57.29	58.0	-	61.2	56.7	-	64.09	57.5
Al ₂ O ₃	20.5	17.2	20.1	13.3	15.7	18.6	16.5	18.1	19.6	18.5	20.7	20.5	16.6	21.7	23.3	-	16.8	16.3	-	16.23	16.7
TiO ₂	0.74	0.48	0.79	0.50	0.74	0.74	0.73	0.74	0.81	0.73	0.69	0.66	0.74	1.16	0.79	-	0.84	0.57	-	0.94	0.83
Na ₂ O	0.78	0.40	0.83	0.70	1.05	0.71	0.72	1.1	1.0	1.0	0.80	0.82	0.87	1.06	-	-	0.84	0.70	-	1.54	1.30
K ₂ O	3.2	1.4	3.0	1.6	3.2	3.4	3.4	2.7	3.2	2.9	3.0	3.0	3.1	2.17	3.08	-	2.55	2.0	-	2.56	5.0
CaO	0.79	0.73	0.86	1.1	0.73	0.55	0.59	1.1	0.76	0.85	0.89	0.61	0.76	2.25	1.04	-	0.72	0.89	-	5.40	3.0
MgO	1.8	0.77	1.9	0.85	1.65	1.60	1.70	1.9	1.80	1.8	1.8	2.2	1.82	1.85	1.68	-	1.10	1.14	-	2.39	2.75
P ₂ O ₅	0.21	0.50	0.19	0.56	0.18	0.17	0.17	0.19	0.19	0.17	0.21	0.18	0.19	0.37	0.18	-	-	0.41	-	0.25	0.18
S _{общ}	0.03	0.10	0.03	0.07	0.02	0.03	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	-	-	-	-	0.07	-	0.06	0.36
Fe ₂ O ₃	7.7	8.7	8.2	6	6.5	7	7.8	7.0	7.2	7.4	8.5	8.0	7.4	7.68	10.5	9.4	6.75	7.4	11.7	7.79	6.7
MnO	0.08	0.23	0.08	0.14	0.07	0.06	0.07	0.10	0.08	0.10	0.08	0.07	0.08	0.1	0.088	0.084	-	0.16	0.19	0.148	0.11
C _{орг}	0.53	8.51	1.22	-	0.48	0.73	-	1.19	1.08	1.03	1.9	1.10	0.84	-	-	1.48	-	4.8	15.9	2.0	0.9

Примечания. Источник (римские цифры): I – данная работа; II – Меубек, Мартин, 1979; III – Sholkovitz, Price, 1980; IV – Гордеев, Монин, 1988; V – Vouchez et al., 2011; VI – Савенко, 2006; VII – Григорьев, 2003. I–VII – представлены средние содержания элементов.

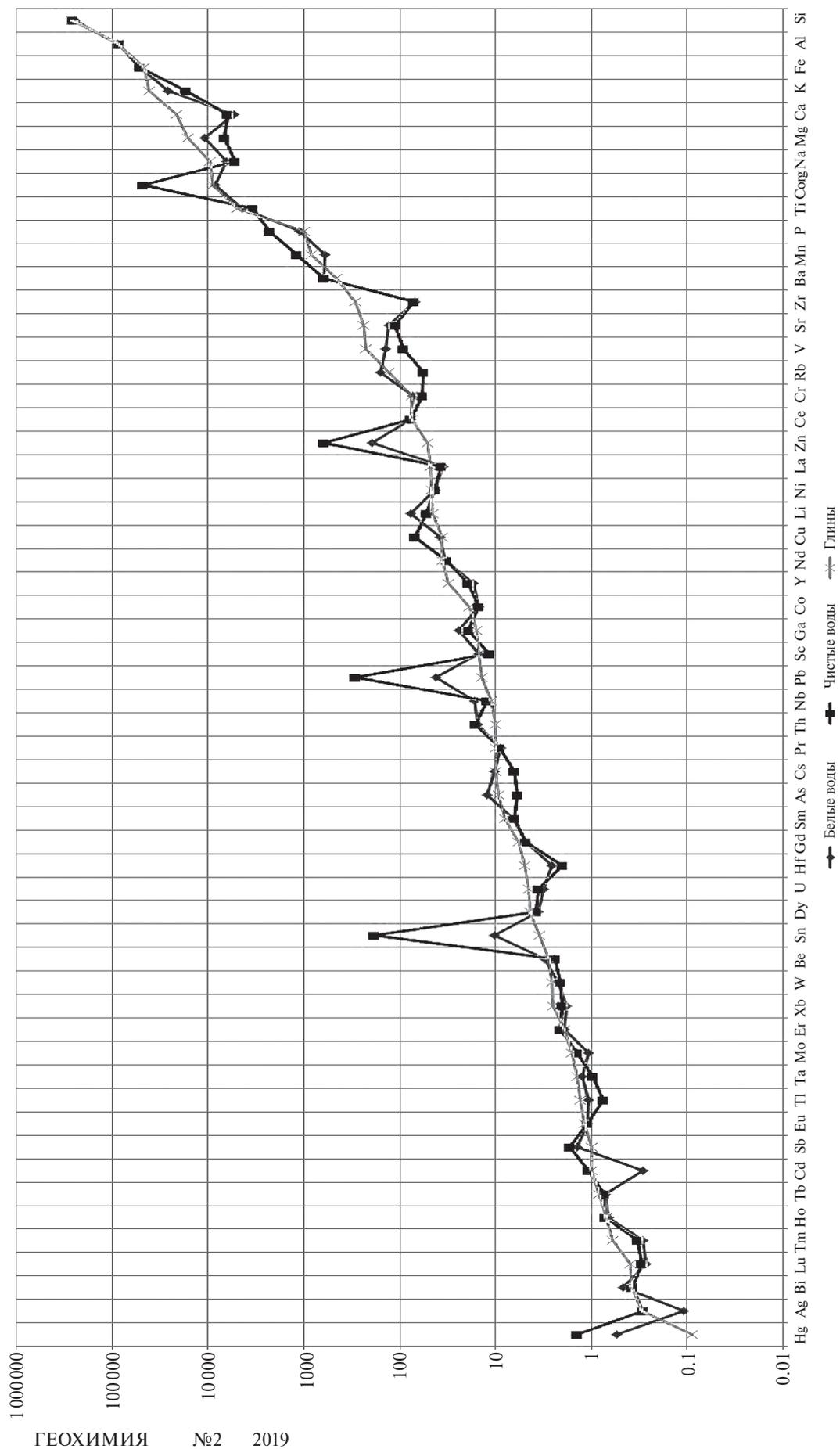


Рис. 2. Содержание элементов во взвесьях: по ординате — г/г; по абсциссе — элементы.

Таблица 2. Микроэлементный состав взвеси, г/т

Элемент	№№ станций												Взвесь Амазонки						Реки мира	Глинистые породы	
													Белые воды			Чистые воды					Черные воды
	1004 1	1008 1	1015 1	1018 2	1020 2	1021 2	1022 3	1037 1	1040 2	1041 1	1042 1	1044 2	I	II	IV	V	I	IV			
Ag	0.21	0.49	0.08	0.28	0.09	0.05	0.06	0.13	0.15	0.11	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.29	3.0	13.6	0.3		
As	12.0	3.8	12.2	4.0	8.3	12.9	13.8	11.7	9.9	10.3	12.6	16.1	16.1	12.6	700	6.0	-	-	14		
Ba	673	648	660	59.4	590	630	645	622	636	645	466	651	651	466	330	629	721	998	500		
Be	3.2	2.4	3.1	1.9	2.8	3.4	3.4	2.6	3.0	2.8	3.3	3.2	3.2	3.3	-	2.4	-	-	1.7		
Bi	0.5	0.40	0.47	0.30	0.34	0.48	0.53	0.38	0.41	0.41	0.53	0.60	0.60	0.53	-	0.37	-	-	0.3		
Cd	0.78	2.0	0.27	0.92	0.24	0.11	0.17	0.39	0.27	0.25	0.14	0.24	0.24	0.14	41	1.06	3.1	2.8	0.5		
Co	14.9	17.1	14.6	13.6	13.3	15.6	15.8	14.8	14.6	15.0	15.9	15.2	15.2	15.9	193	15.2	51	13	19		
Cr	99.1	68.3	73.8	47.8	61.2	72.2	73.8	64.5	64.7	69.0	72.5	74.2	74.2	72.5	13	58.1	260	240	85		
Cs	11.6	5.0	11.4	4.1	7.2	10.2	11.5	8.1	9.6	9.4	11.4	11.4	11.4	11.4	-	6.4	-	-	5.2		
Cu	83.5	82.7	36.8	99	28.8	31.7	32.1	35.3	29.4	29.4	31.0	33.3	33.3	31.0	266	70.5	183	256	45		
Ga	25.3	19.2	24.2	15.0	22.4	25.0	24.8	22.4	23.5	22.8	27.2	25.5	25.5	27.2	19	19.3	-	-	20		
Hf	2.2	2.4	2.1	2.0	1.9	6.8	1.8	2.1	2.1	1.8	2.3	1.9	1.9	2.3	6.2	2.0	6.8	5.5	4.4		
Li	80.3	34.4	77.1	53.2	71.0	92	92	55.6	73.4	72.3	82.0	73.2	73.2	82.0	-	53.3	-	-	35		
Mo	1.4	1.7	1.1	1.7	0.80	1.0	1.0	1.0	1.3	0.9	0.9	1.1	1.1	0.9	0.7	1.43	-	-	1.8		
Nb	17.4	10.4	17.1	10.4	17.0	17.8	17.3	15.5	17.8	16.0	15.5	15.1	15.1	15.5	-	12.3	-	-	13		
Ni	66.3	48.6	44.4	39.7	37.0	42.2	42.9	38.3	36.0	41.0	42.0	43.3	43.3	42.0	105	43.1	121	79	50		
Pb	47	231	46	602	30	34	81	32	35	30	35	38	38	35	105	29.0	80	56	25		
Rb	180	82.8	172	74.2	153	169	169	140	150	158	50	168	168	50	138	122.4	57.7	-	77		
Sb	1.9	2.2	1.3	1.8	1.2	1.5	1.4	1.3	1.3	1.2	1.1	1.3	1.3	1.1	1.9	1.7	-	-	1.0		
Sc	17.4	10.2	17.2	8.8	11.5	12.6	14.4	13.4	14.7	15.8	17.0	17.5	17.5	17.0	18	11.6	-	10.3	14		
Sn	4.5	218	33.5	305	7.3	16.3	14.8	4.7	4.2	3.8	3.8	4.4	4.4	3.8	-	187	-	-	2.9		
Sr	145	86	143	113	115	98	109	158	133	141	130	138	138	130	309	113	130	-	150		
Ta	1.3	0.9	1.3	0.83	1.3	1.4	1.3	1.1	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.2	2.0	0.97	-	-	0.88		
Th	17.8	16.7	17.6	16.5	11.8	13.6	14.9	14.7	15.2	15.2	16.2	17.1	17.1	16.2	13	13.9	19.6	24.9	10		
Tl	1.3	0.7	1.1	0.54	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	-	0.75	-	-	0.56		
U	3.5	3.8	3.4	4.0	3.0	3.0	3.0	3.2	3.1	2.9	3.3	3.1	3.1	3.3	2.5	3.6	3.1	23	2.4		
V	145	77.6	145	70	135	140	140	133	140	132	150	149	149	150	142	93	-	-	120		
W	2.6	2.5	2.4	1.7	2.2	2.6	2.3	1.8	2.2	2.1	1.9	2.0	2.0	1.9	-	2.1	-	-	1.4		
Y	20.9	21.6	20.7	17.7	8.2	10.5	14.5	20.5	17.3	17.9	19.5	20.7	20.7	19.5	-	19.1	-	-	21.6		
Zn	283	774	219	883	152	204	178	172	237	202	148	143	143	148	426	620	1160	924	130		
Zr	75.8	83.4	77.7	66.0	66.0	63.4	61.8	73.9	69.0	64.1	74.6	66.1	66.1	74.6	-	71.2	-	-	150		
Hg	0.41	2.44	1.0	-	0.25	1.0	-	0.3	0.42	0.35	0.21	0.26	0.26	0.21	-	1.40	-	-	0.08		

Примечания. I–VII – см. Примечание к табл. 1. Цифра под № станции указывает на число проб.

Отметим также, что сразу после рейса анализы взвеси чистых и черных вод на более значимом количестве проб для некоторых элементов показали следующие результаты: Zn — 1160 г/т (16 проб) и 924 (10 проб) соответственно, Pb — 80 (8) и 56 (6), Cu — 183 (20) и 256 (17), Ag — 3.0 (7) и 13.6 (4), Cd — 3.1 (8) и 2.8 (6), U — 3.1 (3) и 23.0 (3). Видно, что новые результаты, как и по данным 80-х годов, по цинку выше средних глобальных для речного стока значений, тогда как по свинцу новые данные значительно превышают как предыдущие значения, так и глобальные для рек величины. Ранее данные по ртути и олову отсутствовали, но более высокие содержания были определены во взвеси и чистых, и черных вод для меди, серебра и кадмия. Особенно заметны высокие содержания серебра и урана во взвеси черных вод, хотя и тогда количество проб было совсем незначительным.

Ртуть, по-видимому, связана с органическим углеродом, поскольку максимальные содержания обоих элементов установлены в образце взвеси из чистых вод Шингу (ст. 1008, рис. 1): 8.5 мас.% C_{орг} и 2.44 г/т ртути (табл. 1 и 2). Тот же образец отличается повышенным содержанием кадмия (2 г/т), свинца (231 г/т), сурьмы (2.2 г/т), олова (218 г/т) и цинка (774 г/т), что можно связывать с влиянием органических компонентов на формы миграции цветных металлов во взвесах Амазонки. Ранее было высказано предположение о том, что растворенные в водах Амазонки металлы мигрируют в форме металлоорганических комплексов (Boyle et al., 1982). В данном случае такая связь прослеживается для взвешенных форм миграции органики и металлов в водах Амазонки. Следует отметить, что конкретные данные о связи тяжелых металлов с органическими компонентами в природных водах, в частности с гуминовыми и фульвокислотами, неоднократно приводились в литературе (Монин, Гордеев, 1988; Boyle et al., 1982; Malm, Castro, 1995; Veiga et al., 1999).

В целом можно говорить о большей близости по содержаниям упоминаемых металлов во взвеси из чистых и черных вод по сравнению со взвесью из белых вод.

Из обзора литературных данных следует, что только для взвесей из белых вод имеются довольно многочисленные материалы для сравнения с нашими данными. Особенно это относится к работам (Тримонис и др., 1987; Elbaz-Poulichet et al., 1999; Milliman, Farmswoth, 2011; Bouchez et al., 2010; Gaillardet et al., 1997; Sayler, Boaventura, 2003). Часть из них представлена в табл. 2. Из

нее следует, что практически данные по взвеси белых вод хорошо сопоставимы во всех упомянутых работах, включая наши предыдущие и настоящие. Отдельные единичные пробы взвеси из чистых и черных вод были представлены в работах (Elbaz-Poulichet et al., 1999; Milliman, Farmswoth, 2011; Gaillardet et al., 1997; Sayler, Boaventura, 2003). В этих работах только несколько определенных элементов совпало с определенными нами. В работах (Elbaz-Poulichet et al., 1999; Gaillardet et al., 1997) во взвеси чистых вод (Тромбетас и Тапажос — по одной пробе) содержание железа было равным 8.06 и 6.0 мас.% соответственно. Во взвеси Риу-Негру железа содержалось 4.14 мас.%, свинца — 62.8 г/т, урана — 2.4 г/т. В другой работе (Sayler, Boaventura, 2003) было исследовано всего две пробы из рек с чистой водой (Тромбетас и Тапажос) и одна из Риу-Негру. Удивительно высокое содержание железа определено в пробе из черной воды — 31.56 мас.% (концентрация взвеси — 8.9 мг/л), из других элементов стоит отметить Mn — 344, Cu — 25.7, Zn — 228.9 и U — 3.1 (все в г/т).

Распределение редкоземельных элементов (табл. 3) во взвесах Амазонки и притоков показывает, что диапазон их суммарной концентрации в большей части образцов (14 из 19) близок к таковому для глинистых осадочных пород (Gordeev et al., 1985), а в остальных — почти в два раза ниже. При этом характер их распределения однообразен, о чем свидетельствует стабильность цериевой, и европиевой аномалий, которые во взвеси чистых вод равны в среднем 0.94 и 0.87 и во взвеси белых вод — 0.95 и 0.89 соответственно. Другими словами, обе аномалии слабо отрицательны, что является показателем стабильности состава редкоземельных элементов в породах площади водосбора реки.

Суммарное содержание редкоземельных элементов колеблется для чистых вод в пределах 109–201 г/т, в среднем 152 г/т, для белых вод — в диапазоне 99–228 г/т, в среднем 174 г/т. Это очень близко к среднему содержанию в глинистых осадочных породах (172 г/т), что свидетельствует об относительной однородности исследованного материала.

В связи с особым вниманием исследователей к проблеме ртути в бассейне реки остановимся кратко на данных о ртути и золоте, поскольку издавна золото в бассейне Амазонки добывают с применением ртути. Средние содержания ртути в глинистых породах и во взвесах рек (кроме Амазонки) почти идентичны (0.089 и 0.077 г/т), но во взвеси Амазонки оно в пять с лишним раз

Таблица 3. Редкоземельные элементы во взвеси вод Амазонки, г/т

Эле- мент	Число проб														Белые воды				Чистые воды		Черные воды			
	1004	1008	1015	1018	1020	1021	1022	1037	1040	1041	1042	1044	I	II	IV	V	I	IV						
	1	1	1	2	2	2	3	1	2	1	2	2	2	2	2	2	35.6	48	44	41.8		36.9	55.3	
La	47.5	41.8	45.5	29.6	18.0	24.2	33.5	37.8	35.1	39.0	42.9	35.9	39.0	35.1	39.0	42.9	35.9	35.6	48	44	41.8	36.9	55.3	45.9
Ce	100.5	89.5	95.5	59.3	44.3	56.2	73.9	80.0	78.6	81.9	91.6	76.6	81.9	78.6	81.9	91.6	76.6	77.5	112	110	85.4	76.9	132	112
Pr	11.5	9.8	11.0	7.6	5.0	6.4	8.4	9.2	8.7	9.5	10.5	9.2	9.5	8.7	9.5	10.5	9.2	8.9	-	-	9.5	9.0	-	-
Nd	42.5	35.2	41.3	28.2	19.0	24.5	31.9	35.3	32.4	34.0	39.5	34.5	34.0	32.4	34.0	39.5	34.5	33.4	-	41	37.5	32.5	60	49
Sm	8.2	6.6	8.0	5.5	3.8	5.0	6.2	6.8	6.3	7.0	7.7	6.8	7.0	6.3	7.0	7.7	6.8	6.5	-	8.1	7.4	6.4	12.2	7.6
Eu	1.4	1.1	1.3	1.0	0.68	0.85	0.87	1.2	1.1	1.2	1.4	1.3	1.2	1.1	1.2	1.4	1.3	1.1	-	1.6	1.56	1.1	2.3	1.6
Gd	5.8	5.0	5.7	4.4	2.8	3.6	4.6	5.1	4.6	5.1	5.7	5.3	5.1	4.6	5.1	5.7	5.3	4.8	-	-	6.3	4.8	10.3	-
Tb	0.79	0.77	0.85	0.64	0.41	0.50	0.67	0.74	0.68	0.82	0.87	0.85	0.82	0.68	0.82	0.87	0.85	0.71	-	1.15	0.97	0.74	1.95	2.72
Dy	4.2	4.1	4.2	3.5	2.1	2.6	3.7	4.0	3.4	3.8	4.3	4.0	3.8	3.4	3.8	4.3	4.0	3.6	-	-	5.6	3.8	-	-
Ho	0.78	0.79	0.78	0.67	0.40	0.48	0.59	0.76	0.64	0.70	0.80	0.76	0.70	0.64	0.70	0.80	0.76	0.67	-	-	1.1	0.72	-	-
Er	2.3	2.4	2.3	2.0	1.2	1.4	1.7	2.2	1.8	2.0	2.3	2.1	2.0	1.8	2.0	2.3	2.1	1.9	-	-	3.1	2.1	-	-
Tm	0.32	0.36	0.35	0.28	0.18	0.19	0.25	0.31	0.27	0.34	0.34	0.40	0.34	0.27	0.34	0.34	0.40	0.29	-	0.54	0.47	0.33	1.03	1.31
Yb	2.2	2.3	2.2	1.9	1.2	1.3	1.6	2.1	1.7	1.9	2.2	2.1	1.9	1.7	1.9	2.2	2.1	1.8	3.7	2.8	3.2	2.0	8.0	8.56
Lu	0.34	0.34	0.32	0.27	0.18	0.19	0.24	0.32	0.26	0.29	0.32	0.30	0.29	0.26	0.29	0.32	0.30	0.27	-	0.49	0.50	0.30	1.36	1.46
ΣTR	228	201	219	109	99	130	171	184	144	188	210	180	188	144	188	210	180	174	-	-	204.5	166	-	-
Ce*	0.91	1.04	0.93	0.86	1.01	0.97	0.95	0.93	0.98	0.98	0.94	0.91	0.98	0.98	0.98	0.94	0.91	-	-	-	-	-	-	-
Eu*	0.89	0.84	0.84	0.90	0.92	0.87	0.90	0.89	0.90	0.83	0.92	0.90	0.83	0.90	0.83	0.92	0.90	-	-	-	-	-	-	-

Примечания. I–VII — см. Примечание к табл. 1. Ce* — цериевая аномалия; Eu* — европиевая аномалия.

выше (0.55 г/т во взвеси белых вод, еще выше — 1.4 г/т — в чистых водах (табл. 2). Среднее содержание золота минимально в глинистых породах (0.0065 г/т), но повышается в восемь раз в речных взвесах мира — 0.05 г/т (Морозов и др., 1974) и еще в пять раз во взвесах Амазонки — 0.25 г/т (Malm, Castro, 1995; Martin, Meybeck, 1979). Разрозненные сведения о добыче золота и сопутствующем загрязнении акватории Амазонки ртутью публиковались во многих работах (Harada, 1978; Lacerda, 1995; Lacerda et al., 1990; Sioli, 1950; Malm, Castro, 1995; Veiga et al., 1999; Vital, Stattegger, 2000, и др.), но оценки валовых величин противоречивы.

Сопряженное с добычей золота ртутное загрязнение окружающей среды распространилось в той или иной степени как на основное русло, так и на притоки Амазонки. Золото извлекают без предварительного обогащения из песков амальгамным методом, не жалея ртути, что приводит к ее выбросу в окружающую среду. По статистике 20-летней давности (Veiga et al., 1999), Бразилия вместе с другими латиноамериканскими странами добывали до 188 т в год. Добыча золота породила серию взаимосвязанных проблем и ситуаций, в том числе экологических, медицинских, экономических и криминальных. Ключевая экологическая проблема — это кустарная амальгамация с минимальными затратами на покупку ртути. В результате добытчик получает золотой осадок с некоторой примесью ртути, а основная ее часть поступает в воздух, в реку, почву, флору и фауну.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные новые данные о содержании во взвесах Амазонки и притоков 58 макро- и микроэлементов подтверждают приводившиеся ранее сведения о широком диапазоне состава взвеси в бассейне крупнейшей реки мира. Определенное сходство в целом наших результатов с ранее опубликованными данными может служить подтверждением их достоверности, что относится и к представительности собранного материала, и надежности аналитических данных.

Другим существенным результатом является определенная сопоставимость оценок средних содержаний элементов в изученных взвесах Амазонки со средним составом взвесей рек мира и со средним составом глинистых пород континентов. Так, взвеси Амазонки близки к среднему составу взвеси рек мира по содержанию боль-

шинства исследованных элементов. На этом фоне выделяется заметное обогащение взвеси из чистых вод бассейна Амазонии (по сравнению с мировым уровнем для рек) цинком, медью, свинцом, оловом, кадмием и ртутью. Такое сочетание металлов может свидетельствовать о наличии рудной минерализации на конкретных участках водосборной площади.

Приведенное нами среднее содержание ртути во взвеси белых и чистых вод Амазонии (соответственно 0.55 и 1.4 мкг/л) связано, в первую очередь, с антропогенным фактором. Для более обоснованного заключения необходимо серийное исследование речной взвеси в разных частях бассейна и в разные сезоны года. Примером влияния антропогенного фактора на концентрацию ртути в реках является ее среднее содержание во взвесах ряда рек Подмосковья (7.4 г/т) и Эльбы (30 г/т), а также максимальные содержания во взвесах некоторых других европейских рек — Дона (94 г/т) и реки Иль в Франции (до 438 г/т) (Савенко, 2006).

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума 1.2.49 (Взаимодействие физических, химических и биологических процессов в океане) и гранта РНФ № 14–27–00114.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Батурич Г.Н. (1968) Соотношение форм миграции урана в водах рек СССР. *ДАН СССР* **178**(3), 698–701.
- Батурич Г.Н., Коченов А.В. (1969) Миграция урана в реках и время его пребывания в водах Мирового океана. *Геохимия* (6), 715–723.
- Гордеев В.В. (1981) Новая оценка поверхностного стока растворенных и взвешенных веществ в океан. *ДАН СССР* **262**(5), 138–141.
- Гордеев В.В. (1983) *Речной сток в океан и черты его геохимии*. М.: Наука, 152 с.
- Гордеев В.В. (2012) *Геохимия системы река — море*. М.: И.П., 452 с.
- Гордеев В.В., Монин А.С. (1988) *Геохимия Амазонской речной системы Амазония* (Под ред. Монина А.С., Гордеева В.В.). М.: Наука, 90–113.
- Гордеев В.В., Орешкин В.Н. (1990) Серебро, кадмий и свинец в водах реки Амазонки, ее притоков и эстуария. *Геохимия* (2), 244–256.
- Григорьев Н.А. (2003) Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры. *Геохимия* (7), 785–792.
- Карандашев В.К., Хвостиков В.А., Носенко С.В., Бурмий Ж.П. (2016) Использование высокообогащенных стабильных изотопов в массовом анализе образцов горных пород, грунтов, почв и донных отложений ме-

- тодом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, **82**(7), 6–15.
- Лисицын А.П. (1974) *Осадкообразование в океане*. М.: Наука, 438 с.
- Монин А.С., Гордеев В.В. (1988) *Амазония*. М.: Наука, 214 с.
- Монин А.С., Копелевич О.В. (1983) Гидрооптическое влияние Амазонки на океан *ДАН* **273**(6), 1482–1486.
- Морозов Н.П., Батурич Г.Н., Гордеев В.В., Гурвич Е.Г. (1974) О составе взвеси и осадков устьевых районов Северной Двины, Мезени, Печоры и Оби. *Гидрохимические материалы* **60**, 60–73.
- Савенко В.С. (2006) *Химический состав взвешенных наносов рек мира*. М.: ГЕОС, 175 с.
- Тримонис А.Э., Стрюк В.Л., Гордеев В.В. (1987) Количественное распределение взвеси в Амазонке и в прилегающей части Атлантического океана. *Океанология* **37**(6), 971–976.
- Bouchez Y., Lupker M., Gaillardet Y., France-Lanord C., Maurice L. (2010) Grain size control of river suspended sediment geochemistry: clue from Amazon River depth profiles *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **12**(3), 6955–6970.
- Boyle E.A., Husted S.S., Grant B. (1982) The chemical mass-balance of the Amazon plume II Cu, Ni, and Cd. *Deep-Sea Res., A*, **29**(11), 1355–1364.
- Edmond J.M., Boyle E.F., Grant B., Stallard R.F. (1981) The chemical mass-balance in the Amazon plume I: the nutrients. *Deep-Sea Res.*, **28**(11), 1339–1364.
- Elbaz-Poulichet F., Seiler P., Maurice-Bourgoin L., Guyot, J.-L. and Dupuy, C. (1999) Trace element geochemistry in the Upper Amazon drainage basin (Bolivia). *Chem. Geology* **157**, 319–339.
- Gaillardet J., Dupre B., Allegre C.J., Negrel E. (1997) Chemical and physical denudation in the Amazon River Basin. *Chem. Geol.* **142**, 141–173.
- Gibbs R.J. (1967) The geochemistry of Amazon River system: I. The factors that control the salinity and the composition of suspended solids. *Geol. Amer. Bull.* **78**, 1203–1242.
- Gibbs R.J. (1976) Amazon River sediment transport in the Atlantic Ocean. *Geology* **4**(1), 45–48.
- Gibbs R.J. (1977) Transport phases of transition metals in Amazon and Yukon rivers. *Bull. Geol. Soc. Amer.* **88**(6), 829–843.
- Gordeev V.V., Miklishansky A.Z., Migdisov A.A., Artemiev V.E. (1985) Rare element distribution in the surface suspended materials in major world rivers. *Transport of carbon and minerals in major world rivers. Pt 3*. Eds. E.T. Degens et al. Hamburg: SCOPE/UNEP, 225–243.
- Gromet L.P., Dymec R.F., Haskin L.A., Korotev V.R. (1984) The “North American shale composite”: Its compilation, major and trace element characteristics. *Geochim. Cosmochim. Acta* **48**(12), 2469–2482.
- Harada M. (1978) Methyl-mercury poisoning due to environmental contamination (Minamata disease). *Toxicity of heavy metals in Environment* Ed. E.W. Ochme, N.Y. Marcel Dekker Inc., 267–302.
- Lacerda L.D. (1995) Amazon mercury emission. *Nature* **374**, 20–21.
- Lacerda L.D., De Paula F.C.F., Ovalle A.R.C. (1990) Trace metals in fluvial sediments of the Madeira River waters, Amazon, Brazil. *Sci. Total Environ.* **97/98**, 525–530.
- Malm O., Castro M.B. (1995) An assessment of Hg pollution in different goldmining areas, Amazon, Brazil. *The Science of the Total Environment*. **175**, 127–140.
- Martin J.M., Meybeck M. (1979) Chemical composition of river-borne particulates. *Marine Chem.* **7**(2), 193–206.
- Martinelli L.A., Ferreira J.R., Fosberg B.R., Victoria R.L. (1988) Mercury contamination in the Amazon: a Gold Rush Consequence. *Ambio*. **17**(4), 252–254.
- Meybeck M. (1982) Carbon, nitrogen and phosphorus transport by world rivers *Amer. J. Sci.* **282**, 401–450.
- Milliman J., Farmsworth K.L. (2011) *River Discharge to the Coastal Ocean: a Global Synthesis* Cambridge Univ. Press., 384 pp.
- Sayler P.T., Boaventura G.R. (2003) Distribution and partition of trace metals in the Amazon basin. *Hydrol. Process.* **17**, 1345–1361.
- Sholkovitz E.R. (1993) The geochemistry of rare earth elements in the Amazon River estuary. *Geochim. et Cosmochim. Acta.* **57**, 2181–2190.
- Sholkovitz E.R., Price N.B. (1980) The major element chemistry of suspended matter in the Amazon estuary. *Geochim. Cosmochim. Acta* **44**(2), 163–171.
- Sholkovitz E.R., Szymczak R. (2000) The estuarine chemistry of rare earth elements comparison of the Amazon, Fly, Sepik and the Gulf of Papua systems. *Earth. Planet. Sci. Lett.* **179**, 299–309.
- Sioli H. (1950) Das Wasser im Amazonas – gebietes. *Forsch. Fortschr.* **26**, 274–280.
- Veiga M.M., Hinton J., Lilly C. (1999) Mercury in the Amazon. A comprehensive review with special emphasis on bioaccumulation and bioindicators. *Proc. Nat. Inst. for Minamata Disease Forum in Oct.*, 19–39. Minamata, Japan.
- Vital H., Stattegger K. (2000) Major and trace elements in stream sediments from the lowermost Amazon River. *Chemical Geology* **168**, 151–168.
- Wallace A.R. (1889) *A narrative of travels on the Amazon and Rio Negro, with account of the native tribes*. Ward, Lock and Company.

GEOCHEMISTRY OF SUSPENDED MATTER IN THE AMAZON RIVER WATERS

G. N. Baturin^{a, *}, V. V. Gordeev^{a, **}

^a *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nahimovskiy prospect, Moscow, Russia, 117997*

**e-mail: galibatur@list.ru*

***e-mail: gord_vv@mail.ru*

Received: 22.10.2017

Received version received: 18.12.2017

Accepted: 15.01.2018

The duplicate samples of the Amazon River suspended matter (SM) collected during Cruise 9th of R/V Professor Shtokman were studied using modern analytical techniques. Waters of the Amazon basin are subdivided into three main types differing in SM content and chemical composition: white (turbid yellow waters of the Amazon River and Madeira tributary), clear (transparent waters of the large Xingu, Tapajós, Trombetas, and Tocantins tributaries) and black (waters with strong coffee color, high content of dissolved organics, and elevated acidity, Riu Negro). The specific features of SM from different parts of the river basin have been established. The contents and relationships of major and trace elements in SM vary within wide ranges, but in general the bulk composition of SM is close to the average composition of river SM and clay rocks, except for some samples from clear waters. The SM of the white and clear waters (blackwater samples unfortunately have not been preserved) are variably enriched in Hg. Literature data indicate that artisanal gold mining with the use of Hg (amalgamation method) has been carried out for many years in the Amazon Basin, i.e., SM enrichment in Hg is related to the anthropogenic factor. At the same time, significant (up to two orders of magnitude) enrichment of SM of the clear water Xingu and Tokantins rivers, the Amazon tributaries, in Sn, Zn, Pb, and to lesser extent, in Cu, Cd, Ag, and some other metals give grounds to suggest ore mineralization in these regions.

Keywords: geochemistry, world's rivers, SM, trace elements, Amazon water

(For citation: Baturin G.N., Gordeev V.V. Geochemistry of Suspended Matter in the Amazon River Waters. *Geokhimiya*. 2019;64(2): 195–205. **DOI:** 10.31857/S0016-7525642195-205)