

ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВОД УСТЬЕВОГО УЧАСТКА р. КОЛЫМЫ В СОВРЕМЕННЫЙ ПЕРИОД¹

© 2025 г. А. В. Савенко^{a,*}, В. С. Савенко^a, В. А. Ефимов^a, О. С. Покровский^{b,c}

^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

^bНациональный исследовательский Томский государственный университет, Томск, 634050 Россия

^cИнститут экологических проблем Севера УрО РАН, Архангельск, 163000 Россия

*e-mail: Alla_Savenko@rambler.ru

Поступила в редакцию 06.06.2024 г.

После доработки 06.06.2024 г.

Принята к публикации 30.06.2024 г.

Представлены новые данные о содержании ионов основного солевого состава и растворенных микроэлементов в водах устьевого участка р. Колымы и ее нижних притоков (Омолон, Малый Анюй, Амболиха, Пантелеиха) во время спада весенне-летнего половодья и летне-осенней межени. Приведены аргументы, доказывающие присутствие в водах приустьевой части р. Колымы двух генетических составляющих, имеющих разный макро- и микроэлементный состав. Показано закономерное изменение минерализации и микроэлементного состава речного стока в моря Российской Арктики с запада на восток, связанное, предположительно, с увеличением в этом направлении распространенности постоянной многолетней мерзлоты на водосборах.

Ключевые слова: микроэлементы, растворенные формы, речные воды, Колыма, Российская Арктика.

DOI: 10.31857/S0321059625010113 **EDN:** UXLATB

К настоящему времени накоплен обширный массив данных по основному солевому составу вод важнейших рек мира и получены достаточно надежные оценки ионного стока в океан [1, 23, 26, 27]. Аналогичные сводки по растворенным микроэлементам [3, 17] базируются на значительно меньшем объеме фактического материала, что существенно осложняет количественную характеристику влияния материкового стока на химию океана, в том числе на эколого-токсикологическое состояние акваторий, прилегающих к устьям крупных рек. Особенно слабо изучен микроэлементный состав арктических рек, геохимический мониторинг которых представляет повышенный интерес в связи с происходящими изменениями климата, влияющими на формирование химического состава вод суши. С целью восполнения недостатка информации получены и обобщены данные о концентрациях растворенных микроэлементов в водах устьевого участка р. Колымы и проведено их сравнение с микроэлементным составом речного стока в другие

моря Российской Арктики [12, 13, 15, 16, 20, 22, 25, 28, 31, 32, 34]. (Для удобства сравнения химического состава стока разных рек под устьевым участком понимается пресноводная часть устьевой области реки, включая дельту при ее наличии.).

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Речной границей устьевого участка р. Колымы длиной 282 км принято считать пос. Колымское выше впадения р. Омолон [8, 9]. На протяжении широкопойменного придельтового отрезка встречается несколько крупных очагов размыва едомных отложений, в том числе Дуванный Яр длиной > 10 км. Река имеет дельту, подверженную слабому влиянию нагонов, с вершиной у пос. Черского. Дельта разделяется на два основных рукава — протоки Походская Колыма и Каменная Колыма, доля стока последнего из них составляет > 70% [8].

Район опробования устьевого участка р. Колымы включал в себя как саму реку на придельтовом отрезке и в дельте, так и устья ее притоков — рек Омолон, Малый Анюй, Амболихи

¹ Изучение распределения фтора выполнено за счет Российского научного фонда (проект 24-17-00088, <https://rscf.ru/project/24-17-00088/>).

и Пантелеихи (рис. 1). Выполнены три гидролого-гидрохимические съемки, охватывающие фазы повышенной водности: спад весенне-летнего половодья (1–8 июля 2020 г.) и летне-осеннюю межень (28 июля – 10 августа 2019 г. и 20–31 июля 2021 г.). Средние за периоды наблюдений расходы воды р. Колымы в вершине дельты и наиболее крупного притока р. Омолон, приносящего ~16% стока, превышали среднегодовые величины соответственно в 2.1–2.3 и 1.8 раза; водность менее значимых притоков

была близка к среднегодовым величинам (табл. 1).

Пробы воды отбирали пластиковой емкостью с поверхности или пластмассовым батометром из глубинных слоев и сразу после этого подготавливали их для лабораторных исследований. Растворы, отфильтрованные в полипропиленовые флаконы через плотный бумажный фильтр, использовали для определения содержания хлоридов и сульфатов методом капиллярного электрофореза на установ-

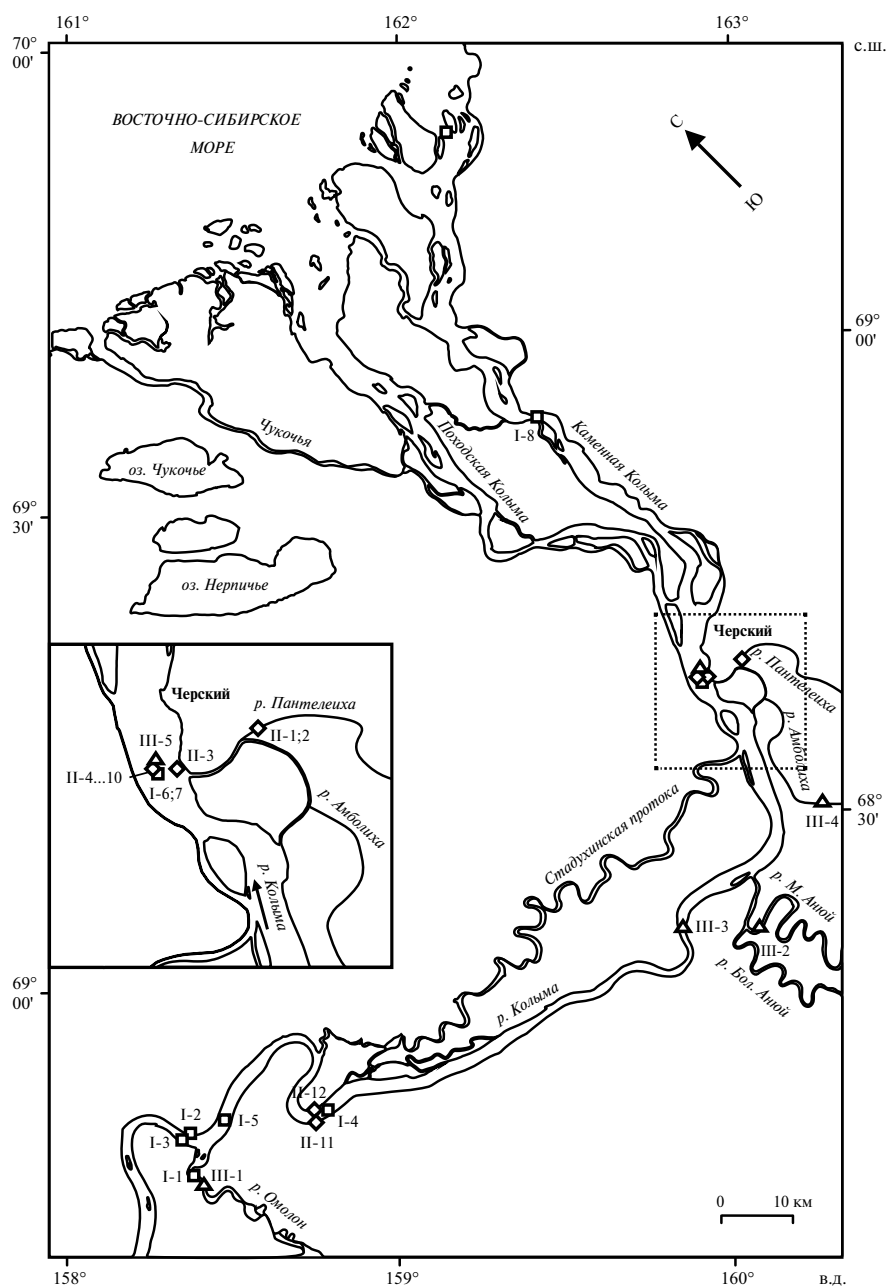


Рис. 1. Расположение точек отбора проб воды на устьевом участке р. Колымы в 2019 г. (I-№), 2020 г. (II-№) и 2021 г. (III-№).

Таблица 1. Расходы воды в вершине дельты р. Колымы и в устьях ее притоков во время съежек

Река	Период наблюдений	Фаза водного режима	Расход воды, м³/с	
			период наблюдений	средне-многолетний
Колыма, у пос. Черского	02–08.07.2020	Спад весенне-летнего половодья	7680 ± 1400	3340*
Там же	28.07–10.08.2019, 20–31.07.2021	Летне-осенняя межень	7060 ± 160	«
Омолон, устьевого створ	01.08.2019, 20.07.2021	То же	1230 ± 330	680*
Малый Анюй	20.07.2021	«	258	250**
Амболиха	20.07.2021	«	2.0	1.8**
Пантелеиха	01.07.2020	Спад весенне-летнего половодья	22	20**

* [8].

** Данные сотрудников гидропоста Северо-Восточной научной станции РАН.

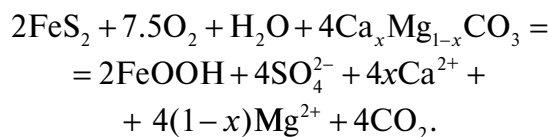
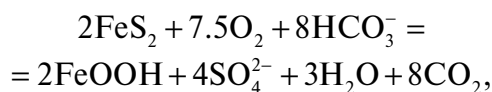
ке “Капель 103Р”, щелочности ($\sim \text{HCO}_3^-$) — объемным ацидиметрическим методом и концентрации фторидов — методом прямой потенциометрии с фторидным ионоселективным электродом в присутствии ацетатного солевого буфера. Концентрации главных катионов и растворенных микроэлементов определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе Agilent 7500ce в растворах, полученных путем фильтрации через мембранный ацетат-целлюлозный фильтр с диаметром пор 0.45 мкм во флаконы с предварительно добавленными туда аликвотами 5 N азотной кислоты марки ос.ч. (0.25 мл на 10 мл пробы). Относительная погрешность измерений составила $\pm 3\%$. Правильность анализов оценивали с помощью международного стандарта речной воды SLRS-6, для которого расхождение измеренных и сертифицированных концентраций изученных элементов было $\leq 20\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение и средние концентрации растворенных форм компонентов основного солевого состава и микроэлементов в водах устьевого участка р. Колымы и ее нижних притоков приведены в табл. 2–7.

Минерализация вод р. Колымы близка к средней для рек мира (табл. 2), однако концентрации натрия, калия, бикарбонатов и особенно хлоридов имеют заметно более низкие значения, тогда как содержание сульфатов существенно превышает среднемировую величину при близких к ней кон-

центрациях кальция и магния. Суровые климатические условия на водосборе р. Колымы должны приводить к снижению интенсивности процессов выветривания и, следовательно, мобилизации компонентов основного солевого состава. Если допустить справедливость этого предположения, надо найти причину повышенных концентраций сульфатов, пониженных концентраций бикарбонатов и таких же, как в мировом речном стоке, концентраций ионов кальция и магния. Такой эффект может создавать на фоне низкой биогеохимической активности процесс окисления сульфидов железа с последующим взаимодействием продуктов реакции с растворенными бикарбонатами или (и) карбонатными породами, в результате чего генерируются сульфат-ионы и ионы кальция и магния, а бикарбонат-ионы разлагаются на воду и диоксид углерода, который удаляется в атмосферу:



Другая особенность основного солевого состава изученных водных объектов — существенно более низкое содержание калия и хлоридов в водах р. Колымы и ее притоков Омолон и Малого Анюя по сравнению с содержанием указанных компонентов в водах притоков Амболихи и Пантелеихи.

Таблица 2. Минерализация (M) и концентрации растворенных форм компонентов основного солевого состава и кремния в водах устьевого участка р. Колымы, мг/л

№ точки	Описание	Дата отбора	Горизонт, м	M	Na	K	Mg	Ca	Cl	SO ₄	HCO ₃	Si
2019 г., летне-осенняя межень												
I-1	р. Омолон, устье	01.08.2019	0.2	54.6	1.77	0.40	2.92	9.04	0.16	15.3	25.0	2.82
I-2	р. Колыма, выше впадения р. Омолон, левый берег	01.08.2019	0.2	96.3	2.27	0.45	5.26	17.2	0.15	41.2	29.8	2.29
I-3	То же, правый берег	01.08.2019	0.2	99.0	2.32	0.45	5.48	17.3	0.17	43.0	30.3	2.35
I-4	р. Колыма, Дуваный Яр	01.08.2019	0.2	95.8	2.34	0.45	5.37	16.5	0.28	40.1	30.7	2.51
I-5	р. Колыма, ниже впадения р. Омолон	01.08.2019	0.2	100.1	2.24	0.44	5.27	16.6	0.15	43.7	31.7	2.22
I-6	р. Колыма, у пос. Черского	31.07.2019	0.2	87.8	2.39	0.43	4.53	15.4	0.26	35.9	28.8	2.52
I-7	То же	10.08.2019	0.2	86.9	2.30	0.46	4.85	15.1	0.25	35.1	28.8	2.25
I-8	р. Колыма, рук. Каменная Колыма	28.07.2019	0.2	82.3	2.15	0.53	4.08	14.2	0.45	34.6	26.4	2.19
I-9	То же, устье	28.07.2019	0.2	86.8	2.36	0.45	4.49	15.1	0.42	37.2	26.8	2.27
2020 г., спад весенне-летнего половодья												
II-1	р. Пантелеиха, устье	01.07.2020	0.2	39.4	1.60	0.84	2.09	5.75	0.90	9.26	18.9	1.25
II-2	То же	01.07.2020	2.0	42.6	1.62	0.81	2.22	5.74	0.77	10.7	20.7	1.35
II-3	р. Колыма, ниже впадения р. Пантелеиха, правый берег	02.07.2020	0.2	59.0	1.80	0.54	3.08	10.0	0.15	21.9	21.5	2.10
II-4	То же, стрежень	03.07.2020	0.2	63.3	1.85	0.53	3.37	10.8	0.16	23.2	23.4	2.07
II-5	То же	03.07.2020	5.0	65.3	1.89	0.54	3.45	11.4	0.16	23.5	24.4	2.57
II-6	«	03.07.2020	10.0	66.0	1.93	0.55	3.54	11.4	0.17	24.0	24.4	2.25
II-7	«	05.07.2020	0.2	65.5	1.83	0.52	3.35	10.7	0.16	24.1	24.9	2.07
II-8	«	05.07.2020	5.0	65.8	1.80	0.51	3.32	10.4	0.19	24.7	24.9	2.01
II-9	«	05.07.2020	10.0	68.0	1.82	0.51	3.33	10.5	0.22	25.8	25.9	2.00
II-10	«	08.07.2020	0.2	68.3	2.03	0.54	3.66	11.5	0.18	26.0	24.4	2.33
II-11	р. Колыма, Дуваный Яр, правый берег	06.07.2020	0.2	70.7	2.04	0.51	3.59	11.8	0.24	24.0	28.5	2.46
II-12	То же, левый берег	06.07.2020	0.2	73.0	1.89	0.52	3.82	11.7	0.25	26.3	28.5	2.39
2021 г., летне-осенняя межень												
III-1	р. Омолон, устье	20.07.2021	0.2	55.9	1.88	0.47	2.98	9.32	0.14	14.2	26.8	2.65
III-2	р. Малый Анюй, устье	20.07.2021	0.2	46.1	1.71	0.51	2.47	6.80	0.12	16.8	17.7	1.50
III-3	р. Колыма, выше впадения р. Малый Анюй	20.07.2021	0.2	85.8	2.51	0.61	4.73	13.8	0.38	31.0	32.7	1.98
III-4	р. Амболиха	20.07.2021	0.2	38.7	1.78	1.12	1.95	5.39	0.79	6.98	20.7	0.37
III-5	р. Колыма, у пос. Черского	31.07.2021	0.2	92.3	2.69	0.64	4.72	14.4	0.14	30.7	39.0	1.99
Средние значения												
р. Колыма, среднее арифметическое ($C_{\text{Кол}}$)				78.9	2.12	0.51	4.16	13.3	0.23	30.8	27.8	2.24
То же, среднее геометрическое ($CG_{\text{Кол}}$)				77.8	2.11	0.51	4.09	13.1	0.21	30.0	27.5	2.23
р. Омолон ($C_{\text{Ом}}$)				55.2	1.83	0.44	2.95	9.18	0.15	14.8	25.9	2.73
р. Малый Анюй ($C_{\text{Ан}}$)				46.1	1.71	0.51	2.47	6.80	0.12	16.8	17.7	1.50
р. Амболиха ($C_{\text{Амб}}$)				38.7	1.78	1.12	1.95	5.39	0.79	6.98	20.7	0.37
р. Пантелеиха ($C_{\text{Пан}}$)				41.0	1.61	0.82	2.15	5.75	0.84	10.0	19.8	1.30
Реки мира ($C_{\text{РС}}$) [26]				85.1	5.52	1.72	2.98	11.9	5.92	8.4	48.6	4.07
Нормирование концентраций в притоках на $C_{\text{Кол}}$												
$C_{\text{Ом}}/C_{\text{Кол}}$				0.70	0.86	0.86	0.71	0.69	0.65	0.48	0.93	1.22
$C_{\text{Ан}}/C_{\text{Кол}}$				0.58	0.81	1.00	0.59	0.51	0.52	0.55	0.64	0.67
$C_{\text{Амб}}/C_{\text{Кол}}$				0.49	0.84	2.20	0.47	0.41	3.43	0.23	0.74	0.17
$C_{\text{Пан}}/C_{\text{Кол}}$				0.52	0.76	1.61	0.52	0.43	3.65	0.32	0.71	0.58

Таблица 3. Концентрации растворенных форм редких щелочных и щелочноземельных элементов в водах устьевоего участка р. Колымы, мкг/л

№ точки	Li	Rb	Cs	Be	Sr	Ba
2019 г., летне-осенняя межень						
I-1	0.14	0.20	0.0003	0.0036	58.9	11.1
I-2	1.05	0.26	0.0011	0.0053	103	12.2
I-3	1.10	0.27	0.0010	0.0058	106	12.5
I-4	1.01	0.25	0.0010	0.0054	102	12.3
I-5	1.06	0.26	0.0012	0.0049	103	12.1
I-6	1.02	0.36	0.0011	0.0050	98.2	12.0
I-7	1.04	0.36	0.0010	0.0053	95.6	12.6
I-8	0.75	0.32	0.0018	0.0054	88.1	11.1
I-9	0.89	0.25	0.0028	0.0053	94.8	12.1
2020 г., спад весенне-летнего половодья						
II-1	0.46	0.58	0.0022	0.0181	37.0	4.58
II-2	0.39	0.54	0.0020	0.0160	39.4	5.04
II-3	0.69	0.27	0.0021	0.0077	65.0	9.77
II-4	0.88	0.26	0.0020	0.0063	70.2	10.8
II-5	0.92	0.31	0.0029	0.0078	76.6	11.3
II-6	0.93	0.28	0.0025	0.0071	71.9	10.9
II-7	0.88	0.25	0.0022	0.0064	70.5	10.5
II-8	0.83	0.24	0.0018	0.0056	70.0	10.6
II-9	0.83	0.24	0.0020	0.0055	69.5	10.4
II-10	0.89	0.27	0.0017	0.0053	77.8	11.1
II-11	0.86	0.27	0.0018	0.0063	79.2	9.56
II-12	1.01	0.29	0.0022	0.0052	82.3	11.3
2021 г., летне-осенняя межень						
III-1	0.11	0.21	0.0002	0.0038	57.5	12.0
III-2	0.28	0.39	0.0004	0.0044	38.2	6.63
III-3	0.83	0.30	0.0008	0.0054	88.5	11.4
III-4	0.43	0.76	0.0011	0.0157	34.3	4.77
III-5	1.00	0.30	0.0009	0.0051	99.8	13.5
Средние значения						
$C_{\text{Кол}}$	0.92	0.28	0.0017	0.0058	85.6	11.4
$CG_{\text{Кол}}$	0.92	0.28	0.0016	0.0057	84.5	11.4
$C_{\text{Ом}}$	0.12	0.20	0.0002	0.0037	58.2	11.6
$C_{\text{Ан}}$	0.28	0.39	0.0004	0.0044	38.2	6.63
$C_{\text{Амб}}$	0.43	0.76	0.0011	0.0157	34.3	4.77
$C_{\text{Пан}}$	0.43	0.56	0.0021	0.0170	38.2	4.81
$C_{\text{РС}} [17]$	1.84	1.63	0.011	0.0089	60	23
Нормирование концентраций в притоках на $C_{\text{Кол}}$						
$C_{\text{Ом}}/C_{\text{Кол}}$	0.13	0.71	0.12	0.64	0.68	1.02
$C_{\text{Ан}}/C_{\text{Кол}}$	0.30	1.39	0.24	0.76	0.45	0.58
$C_{\text{Амб}}/C_{\text{Кол}}$	0.47	2.71	0.65	2.71	0.40	0.42
$C_{\text{Пан}}/C_{\text{Кол}}$	0.47	2.00	1.24	2.93	0.45	0.42

Таблица 4. Концентрации растворенных форм тяжелых металлов в водах устьевого участка р. Колымы, мкг/л

№ точки	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Pb
2019 г., летне-осенняя межень									
I-1	5.27	38.7	0.043	0.16	0.36	1.64	0.0025	0.0009	0.038
I-2	4.46	44.6	0.060	0.81	0.66	2.05	0.0032	0.0011	0.063
I-3	4.80	44.2	0.088	0.91	0.68	1.25	0.0033	0.0011	0.061
I-4	5.06	43.1	0.060	0.65	0.67	2.17	0.0030	0.0009	0.061
I-5	4.55	41.3	0.058	0.75	0.64	1.84	0.0033	0.0011	0.057
I-6	4.60	63.0	0.039	0.69	0.69	1.95	0.0034	0.0008	0.067
I-7	4.90	55.4	0.041	0.72	0.95	2.71	0.0045	0.0010	0.070
I-8	3.67	65.3	0.046	0.62	0.92	2.34	0.0047	0.0010	0.098
I-9	5.91	73.9	0.071	0.67	0.73	2.13	0.0058	0.0011	0.114
2020 г., спад весенне-летнего половодья									
II-1	8.69	904	0.110	1.53	2.10	0.88	0.0029	0.0009	0.200
II-2	8.24	829	0.073	1.29	1.68	0.65	0.0027	0.0008	0.198
II-3	5.68	139	0.043	0.68	0.94	1.05	0.0024	0.0011	0.097
II-4	2.49	93.4	0.040	0.63	0.93	1.27	0.0025	0.0012	0.088
II-5	3.34	90.6	0.044	0.77	0.92	1.14	0.0028	0.0013	0.086
II-6	4.08	91.5	0.041	0.72	0.86	1.21	0.0039	0.0014	0.096
II-7	2.35	78.3	0.037	0.54	0.70	1.31	0.0035	0.0012	0.094
II-8	2.28	73.7	0.035	0.53	0.70	1.48	0.0030	0.0014	0.085
II-9	2.66	79.1	0.056	0.52	0.66	1.32	0.0030	0.0012	0.088
II-10	1.68	58.7	0.036	0.60	0.72	1.25	0.0042	0.0012	0.073
II-11	2.40	94.1	0.067	0.69	0.82	0.67	0.0037	0.0010	0.105
II-12	1.92	61.6	0.033	0.70	0.77	0.89	0.0032	0.0013	0.110
2021 г., летне-осенняя межень									
III-1	4.01	31.2	0.037	0.12	0.43	1.01	0.0026	0.0007	0.058
III-2	4.80	75.1	0.029	0.51	0.72	1.63	0.0024	0.0008	0.075
III-3	2.63	73.7	0.057	0.57	0.66	1.04	0.0042	0.0011	0.090
III-4	5.90	634	0.092	1.51	4.00	4.89	0.0145	0.0014	0.510
III-5	2.80	72.2	0.053	0.61	0.68	1.32	0.0045	0.0011	0.115
Средние значения									
$C_{\text{Кол}}$	3.61	71.9	0.050	0.67	0.76	1.52	0.0036	0.0011	0.086
$CG_{\text{Кол}}$	3.38	68.6	0.048	0.66	0.76	1.43	0.0035	0.0011	0.084
$C_{\text{Ом}}$	4.64	35.0	0.040	0.14	0.40	1.33	0.0025	0.0008	0.048
$C_{\text{Ан}}$	4.80	75.1	0.029	0.51	0.72	1.63	0.0024	0.0008	0.075
$C_{\text{Амб}}$	5.90	634	0.092	1.51	4.00	4.89	0.0145	0.0014	0.510
$C_{\text{Пан}}$	8.47	867	0.092	1.41	1.89	0.77	0.0028	0.0009	0.199
$C_{\text{РС}} [17]$	34	66	0.148	0.80	1.48	0.60	0.080	0.007	0.079
Нормирование концентраций в притоках на $C_{\text{Кол}}$									
$C_{\text{Ом}}/C_{\text{Кол}}$	1.29	0.49	0.80	0.21	0.53	0.88	0.69	0.73	0.56
$C_{\text{Ан}}/C_{\text{Кол}}$	1.33	1.04	0.58	0.76	0.95	1.07	0.67	0.73	0.87
$C_{\text{Амб}}/C_{\text{Кол}}$	1.63	8.82	1.84	2.25	5.26	3.22	4.03	1.27	5.93
$C_{\text{Пан}}/C_{\text{Кол}}$	2.35	12.1	1.84	2.10	2.49	0.51	0.78	0.82	2.31

Таблица 5. Концентрации растворенных форм элементов-гидролизатов в водах устьевое участка р. Колымы, мкг/л

№ точки	Al	Sc	Ga	Ti	Zr	Hf	Th	U
2019 г., летне-осенняя межень								
I-1	13.4	0.033	0.006	0.21	0.012	0.0006	0.0007	0.005
I-2	21.8	0.029	0.011	0.25	0.018	0.0008	0.0023	0.031
I-3	22.8	0.029	0.011	0.24	0.018	0.0009	0.0023	0.032
I-4	20.0	0.025	0.014	0.27	0.018	0.0009	0.0022	0.028
I-5	21.3	0.027	0.010	0.27	0.016	0.0008	0.0021	0.033
I-6	23.6	0.023	0.014	0.37	0.018	0.0008	0.0021	0.029
I-7	22.8	0.021	0.014	0.30	0.020	0.0009	0.0023	0.027
I-8	26.9	0.024	0.018	0.38	0.023	0.0008	0.0022	0.027
I-9	33.4	0.022	0.020	0.43	0.021	0.0008	0.0024	0.032
2020 г., спад весенне-летнего половодья								
II-1	43.4	0.050	0.030	1.27	0.185	0.0088	0.0235	0.035
II-2	42.6	0.047	0.027	1.25	0.174	0.0086	0.0236	0.034
II-3	46.5	0.033	0.021	0.93	0.056	0.0027	0.0082	0.023
II-4	45.8	0.029	0.015	0.56	0.040	0.0018	0.0040	0.027
II-5	54.3	0.033	0.021	0.56	0.036	0.0018	0.0030	0.025
II-6	56.5	0.030	0.021	0.55	0.032	0.0015	0.0029	0.025
II-7	45.6	0.026	0.016	0.62	0.033	0.0014	0.0034	0.028
II-8	41.8	0.025	0.016	0.60	0.031	0.0014	0.0032	0.027
II-9	43.5	0.025	0.018	0.53	0.031	0.0014	0.0030	0.027
II-10	36.0	0.027	0.015	0.46	0.021	0.0011	0.0029	0.023
II-11	35.7	0.029	0.018	0.45	0.032	0.0014	0.0034	0.029
II-12	36.4	0.031	0.014	0.44	0.027	0.0012	0.0031	0.026
2021 г., летне-осенняя межень								
III-1	16.4	0.028	0.009	0.30	0.009	0.0005	0.0005	0.003
III-2	10.0	0.019	0.009	0.27	0.044	0.0020	0.0005	0.014
III-3	20.6	0.029	0.014	0.41	0.026	0.0009	0.0022	0.029
III-4	37.0	0.043	0.027	1.12	0.200	0.0083	0.0238	0.039
III-5	21.2	0.032	0.016	0.37	0.023	0.0009	0.0024	0.032
Средние значения								
$C_{\text{Кол}}$	33.8	0.027	0.016	0.45	0.027	0.0012	0.0030	0.028
$CG_{\text{Кол}}$	31.8	0.027	0.015	0.42	0.025	0.0011	0.0028	0.028
$C_{\text{Ом}}$	14.9	0.031	0.008	0.26	0.010	0.0005	0.0006	0.004
$C_{\text{Ан}}$	10.0	0.019	0.009	0.27	0.044	0.0020	0.0005	0.014
$C_{\text{Амб}}$	37.0	0.043	0.027	1.12	0.200	0.0083	0.0238	0.039
$C_{\text{Пан}}$	43.0	0.049	0.028	1.26	0.180	0.0087	0.0236	0.034
$C_{\text{РС}} [17]$	32	0.004	0.030	0.49	0.039	0.0059	0.041	0.372
Нормирование концентраций в притоках на $C_{\text{Кол}}$								
$C_{\text{Ом}}/C_{\text{Кол}}$	0.44	1.15	0.50	0.58	0.37	0.42	0.20	0.14
$C_{\text{Ан}}/C_{\text{Кол}}$	0.30	0.70	0.56	0.60	1.63	1.67	0.17	0.50
$C_{\text{Амб}}/C_{\text{Кол}}$	1.09	1.59	1.69	2.49	7.41	6.92	7.93	1.39
$C_{\text{Пан}}/C_{\text{Кол}}$	1.27	1.81	1.75	2.80	6.67	7.25	7.87	1.21

Таблица 6. Концентрации растворенных форм иттрия и редкоземельных элементов в водах устьевого участка р. Колымы, мкг/л

№ точки	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
2019 г., летне-осенняя межень															
I-1	0.034	0.025	0.030	0.006	0.027	0.007	0.0025	0.006	0.0009	0.005	0.0010	0.0031	0.0005	0.0032	0.0005
I-2	0.067	0.034	0.061	0.011	0.043	0.013	0.0041	0.015	0.0022	0.012	0.0024	0.0064	0.0009	0.0056	0.0008
I-3	0.069	0.031	0.059	0.010	0.044	0.013	0.0040	0.016	0.0022	0.012	0.0024	0.0067	0.0009	0.0055	0.0009
I-4	0.066	0.032	0.059	0.011	0.046	0.011	0.0040	0.012	0.0020	0.011	0.0021	0.0064	0.0008	0.0051	0.0008
I-5	0.061	0.029	0.056	0.010	0.040	0.012	0.0037	0.014	0.0020	0.011	0.0022	0.0060	0.0008	0.0050	0.0007
I-6	0.057	0.037	0.064	0.012	0.051	0.013	0.0035	0.014	0.0018	0.011	0.0021	0.0060	0.0008	0.0054	0.0009
I-7	0.060	0.033	0.051	0.010	0.042	0.011	0.0032	0.013	0.0018	0.010	0.0021	0.0059	0.0009	0.0057	0.0009
I-8	0.062	0.051	0.072	0.012	0.048	0.012	0.0037	0.014	0.0018	0.010	0.0018	0.0052	0.0007	0.0042	0.0006
I-9	0.063	0.052	0.066	0.012	0.051	0.014	0.0040	0.016	0.0021	0.012	0.0023	0.0061	0.0008	0.0051	0.0008
2020 г., спад весенне-летнего половодья															
II-1	0.240	0.152	0.277	0.047	0.203	0.063	0.0133	0.058	0.0079	0.046	0.0086	0.0237	0.0032	0.0206	0.0032
II-2	0.216	0.142	0.260	0.045	0.193	0.062	0.0125	0.054	0.0075	0.043	0.0080	0.0221	0.0031	0.0193	0.0030
II-3	0.091	0.069	0.131	0.020	0.086	0.027	0.0060	0.023	0.0032	0.019	0.0035	0.0092	0.0013	0.0077	0.0013
II-4	0.074	0.053	0.095	0.016	0.065	0.023	0.0049	0.019	0.0026	0.016	0.0029	0.0078	0.0011	0.0063	0.0010
II-5	0.069	0.063	0.110	0.017	0.071	0.026	0.0053	0.020	0.0027	0.015	0.0029	0.0080	0.0011	0.0066	0.0010
II-6	0.067	0.064	0.096	0.019	0.075	0.028	0.0056	0.021	0.0029	0.016	0.0030	0.0085	0.0011	0.0070	0.0011
II-7	0.064	0.051	0.093	0.015	0.063	0.023	0.0045	0.017	0.0024	0.013	0.0025	0.0069	0.0010	0.0056	0.0009
II-8	0.061	0.049	0.089	0.014	0.059	0.023	0.0043	0.017	0.0024	0.013	0.0024	0.0066	0.0009	0.0055	0.0009
II-9	0.066	0.054	0.103	0.016	0.066	0.025	0.0047	0.018	0.0026	0.014	0.0027	0.0071	0.0010	0.0056	0.0009
II-10	0.061	0.037	0.080	0.013	0.056	0.024	0.0043	0.015	0.0020	0.011	0.0022	0.0059	0.0008	0.0049	0.0008
II-11	0.069	0.054	0.095	0.014	0.055	0.022	0.0043	0.014	0.0027	0.014	0.0026	0.0067	0.0009	0.0053	0.0008
II-12	0.057	0.047	0.083	0.011	0.046	0.020	0.0039	0.014	0.0019	0.010	0.0021	0.0054	0.0007	0.0047	0.0007
2021 г., летне-осенняя межень															
III-1	0.028	0.021	0.032	0.006	0.024	0.006	0.0025	0.006	0.0007	0.004	0.0008	0.0028	0.0003	0.0026	0.0004
III-2	0.055	0.031	0.054	0.009	0.041	0.011	0.0033	0.012	0.0016	0.010	0.0019	0.0058	0.0008	0.0061	0.0009
III-3	0.058	0.038	0.056	0.011	0.040	0.014	0.0033	0.013	0.0018	0.011	0.0021	0.0061	0.0009	0.0055	0.0008
III-4	0.221	0.153	0.243	0.048	0.205	0.060	0.0136	0.057	0.0076	0.042	0.0080	0.0221	0.0029	0.0192	0.0029
III-5	0.063	0.037	0.051	0.010	0.045	0.014	0.0038	0.012	0.0020	0.012	0.0023	0.0059	0.0008	0.0053	0.0008
Средние значения															
$C_{\text{Кол}}$	0.065	0.046	0.078	0.013	0.055	0.018	0.0043	0.016	0.0023	0.013	0.0024	0.0066	0.0009	0.0056	0.0009
$CG_{\text{Кол}}$	0.065	0.044	0.076	0.013	0.053	0.017	0.0042	0.016	0.0022	0.013	0.0024	0.0066	0.0009	0.0055	0.0009
$C_{\text{Ом}}$	0.031	0.023	0.031	0.006	0.025	0.006	0.0025	0.006	0.0008	0.005	0.0009	0.0030	0.0004	0.0029	0.0005
$C_{\text{Ан}}$	0.055	0.031	0.054	0.009	0.041	0.011	0.0033	0.012	0.0016	0.010	0.0019	0.0058	0.0008	0.0061	0.0009
$C_{\text{Амб}}$	0.221	0.153	0.243	0.048	0.205	0.060	0.0136	0.057	0.0076	0.042	0.0080	0.0221	0.0029	0.0192	0.0029
$C_{\text{Пан}}$	0.228	0.147	0.268	0.046	0.198	0.062	0.0129	0.056	0.0077	0.044	0.0083	0.0229	0.0031	0.0199	0.0031
$C_{\text{РС}} [17]$	0.040	0.120	0.262	0.040	0.152	0.036	0.0098	0.040	0.0055	0.030	0.0071	0.020	0.0033	0.017	0.0024
Нормирование концентраций в притоках на $C_{\text{Кол}}$															
$C_{\text{Ом}}/C_{\text{Кол}}$	0.48	0.50	0.40	0.46	0.45	0.33	0.58	0.38	0.35	0.38	0.38	0.45	0.44	0.52	0.56
$C_{\text{Ан}}/C_{\text{Кол}}$	0.85	0.67	0.69	0.69	0.75	0.61	0.77	0.75	0.70	0.77	0.79	0.88	0.89	1.09	1.00
$C_{\text{Амб}}/C_{\text{Кол}}$	3.40	3.33	3.12	3.69	3.73	3.33	3.16	3.56	3.30	3.23	3.33	3.35	3.22	3.43	3.22
$C_{\text{Пан}}/C_{\text{Кол}}$	3.51	3.20	3.44	3.54	3.60	3.44	3.00	3.50	3.35	3.38	3.46	3.47	3.44	3.55	3.44

Таблица 7. Концентрации растворенных форм аниогенных элементов в водах устьевго участка р. Колымы, мкг/л

№ точки	F	B	Ge	P _{мин}	V	As	Sb	Cr	Se	Mo	W
2019 г., летне-осенняя межень											
I-1	75.7	3.20	0.008	4.6	0.18	0.15	0.021	0.044	0.021	0.152	0.0014
I-2	107	3.42	0.014	5.5	0.12	0.40	0.073	0.051	0.081	0.159	0.0012
I-3	101	3.35	0.014	5.7	0.12	0.39	0.071	0.059	0.075	0.148	0.0010
I-4	88.2	4.32	0.012	4.4	0.16	0.38	0.068	0.041	0.071	0.142	0.0013
I-5	91.3	4.08	0.012	5.2	0.11	0.39	0.073	0.050	0.079	0.120	0.0010
I-6	88.2	4.95	0.012	5.1	0.20	0.37	0.065	0.062	0.080	0.135	0.0016
I-7	89.4	4.73	0.014	4.5	0.18	0.42	0.066	0.068	0.096	0.125	0.0012
I-8	77.9	3.42	0.014	5.0	0.19	0.38	0.079	0.077	0.089	0.138	0.0013
I-9	83.3	3.46	0.016	4.8	0.19	0.45	0.079	0.081	0.099	0.135	0.0012
2020 г., спад весенне-летнего половодья											
II-1	60.5	5.67	0.057	27.2	0.66	1.70	0.072	0.304	0.072	0.137	0.0041
II-2	61.7	5.53	0.048	22.6	0.64	1.53	0.077	0.173	0.065	0.147	0.0036
II-3	71.1	4.24	0.019	8.0	0.31	0.56	0.064	0.073	0.069	0.140	0.0025
II-4	77.6	3.49	0.017	5.7	0.19	0.44	0.065	0.060	0.081	0.138	0.0026
II-5	77.9	5.63	0.016	7.8	0.25	0.52	0.069	0.065	0.095	0.153	0.0026
II-6	78.9	3.46	0.016	7.9	0.23	0.50	0.066	0.066	0.090	0.143	0.0027
II-7	85.4	3.32	0.015	6.1	0.20	0.44	0.063	0.058	0.080	0.138	0.0026
II-8	85.4	3.24	0.014	5.9	0.19	0.43	0.062	0.057	0.084	0.136	0.0022
II-9	85.8	3.49	0.013	7.2	0.20	0.44	0.065	0.060	0.083	0.144	0.0027
II-10	77.6	3.54	0.013	6.0	0.18	0.43	0.065	0.050	0.086	0.147	0.0022
II-11	84.4	4.43	0.015	6.8	0.20	0.49	0.079	0.074	0.099	0.153	0.0025
II-12	81.3	3.89	0.014	6.7	0.18	0.49	0.071	0.068	0.094	0.150	0.0022
2021 г., летне-осенняя межень											
III-1	70.7	3.02	0.012	4.1	0.21	0.18	0.027	0.036	0.028	0.151	0.0013
III-2	39.6	4.21	0.013	5.4	0.26	0.71	0.088	0.078	0.037	0.112	0.0026
III-3	82.7	5.26	0.013	4.0	0.23	0.41	0.076	0.051	0.073	0.152	0.0023
III-4	54.4	6.66	0.054	24.0	0.59	2.01	0.097	0.185	0.081	0.189	0.0042
III-5	82.7	3.79	0.011	3.1	0.18	0.49	0.078	0.050	0.088	0.151	0.0019
Средние значения											
C _{Кол}	84.9	3.98	0.014	5.8	0.19	0.44	0.070	0.061	0.085	0.142	0.0019
CG _{Кол}	84.5	3.92	0.014	5.6	0.19	0.44	0.070	0.060	0.084	0.142	0.0018
C _{Ом}	73.2	3.11	0.010	4.3	0.20	0.17	0.024	0.040	0.024	0.152	0.0014
C _{Ан}	39.6	4.21	0.013	5.4	0.26	0.71	0.088	0.078	0.037	0.112	0.0026
C _{Амб}	54.4	6.66	0.054	24.0	0.59	2.01	0.097	0.185	0.081	0.189	0.0042
C _{Пан}	61.1	5.60	0.052	24.9	0.65	1.62	0.075	0.239	0.069	0.142	0.0039
C _{РС} *	100	10.2	0.0068	38	0.71	0.62	0.07	0.70	0.07	0.42	0.10
Нормирование концентраций в притоках на C _{Кол}											
C _{Ом} /C _{Кол}	0.86	0.78	0.71	0.74	1.05	0.39	0.34	0.66	0.28	1.07	0.74
C _{Ан} /C _{Кол}	0.47	1.06	0.93	0.93	1.37	1.61	1.26	1.28	0.44	0.79	1.37
C _{Амб} /C _{Кол}	0.64	1.67	3.86	4.14	3.11	4.57	1.39	3.03	0.95	1.33	2.21
C _{Пан} /C _{Кол}	0.72	1.41	3.71	4.29	3.42	3.68	1.07	3.92	0.81	1.00	2.05

* F [3], P_{мин} [14], другие микроэлементы [17].

Концентрации всех щелочных металлов в водах р. Колымы ниже таковых в мировом речном стоке, причем нормированные на сток рек мира значения снижаются по мере увеличения атомного веса элементов: литий (0.50) > натрий (0.38) > калий (0.30) > рубидий (0.17) > цезий (0.15). Концентрации щелочноземельных металлов магния, кальция и стронция в водах р. Колымы близки к оценкам для стока рек мира, тогда как содержание бериллия и бария в 1.5–2 раза ниже среднемирового уровня, что для бериллия связано, по-видимому, с его принадлежностью к группе элементов-гидролизатов, обладающих слабой миграционной подвижностью, а для бария – с повышенной концентрацией сульфат-ионов, образующих труднорастворимое соединение $BaSO_4$.

Концентрации растворенных форм большинства тяжелых металлов (железа, кобальта, никеля, меди, цинка и свинца) в водах р. Колымы сопоставимы со средней в мировом речном стоке и отличаются от него не более чем в 2–3 раза. Вместе с тем концентрации таллия, марганца и кадмия соответственно в 6.4, 10 и 22 раза меньше среднемировых величин. Если аномально низкое содержание кадмия и таллия можно связать с незначительной интенсивностью антропогенного загрязнения в районе наблюдений, а также с достаточно большой неопределенностью оценок среднемировых концентраций, то 10-кратное занижение концентрации марганца в водах р. Колымы объяснить довольно сложно. Возможной причиной этого служит слабое развитие в условиях сурового арктического климата восстановительных процессов, приводящих к переходу марганца в подвижное двухвалентное состояние.

За исключением скандия, концентрации трехвалентных элементов-гидролизатов (алюминия, галлия, иттрия, редкоземельных элементов) в водах р. Колымы и стоке рек мира различаются не более чем в 3–4 раза. Содержание скандия в водах р. Колымы в 6.8 раза превышает среднемировую оценку, которую, однако, нельзя признать достаточно надежной в силу малочисленности определений этого элемента в речных водах. Для четырехвалентных элементов-гидролизатов и урана, обладающего сильными гидролитическими свойствами как в четырех-, так и в шестива-

лентном состоянии, наблюдается закономерное снижение концентраций относительно среднемировых значений при увеличении атомного веса элементов: титан (0.92) > цирконий (0.69) > гафний (0.20) > торий ~ уран (0.074).

Большинство анионогенных элементов (фтор, бор, кремний, германий, ванадий, мышьяк, сурьма, селен и молибден) присутствует в водах р. Колымы в концентрациях, отличающихся от таковых в мировом речном стоке не более чем в 2–3 раза (расхождение для ванадия составляет 3.7 раза). Однако некоторые элементы из этой группы – фосфор, хром и вольфрам – имеют значительно более низкие концентрации в водах р. Колымы: соответственно в 6.6, 11 и 53 раза меньше средних значений для рек мира. Пониженные концентрации фосфора и ванадия, вероятно, связаны с невысокой интенсивностью биологического круговорота в арктических ландшафтах, приводящей к уменьшению подвижности вовлеченных в него элементов. Хром в неизменных горных породах находится, как правило, в трехвалентном состоянии, в котором ведет себя как типичный элемент-гидролизат, образуя труднорастворимые соединения и интенсивно сорбируясь на минеральных и органических фазах. Переход хрома в подвижное шестивалентное состояние происходит в резко окислительной обстановке преимущественно в условиях аридного климата. Поэтому пониженное содержание хрома в водах р. Колымы, по-видимому, обусловлено миграцией основной его массы в малоподвижном трехвалентном состоянии. Аномально низкие концентрации вольфрама наблюдались в водах не только р. Колымы, но и других рек водосборов арктических морей России [13, 15, 16, 20, 22, 28]. Возможно, из-за малого количества определений среднее содержание вольфрама в мировом речном стоке нуждается в уточнении.

Интересная закономерность прослеживается при анализе корреляционных связей концентраций всех растворенных химических элементов (табл. 8). В начале раздела было отмечено низкое содержание калия и хлора в водах р. Колымы и ее притоков Омолона и Малого Анюя по сравнению с притоками Амболихой и Пантелеихой. Если допустить, что в водах устьевого участка р. Колымы есть две генетические составляющие

Таблица 8. Коэффициенты корреляции r_i минерализации и отдельных составляющих стока растворенных веществ в водах устьевых участка р. Колымы, за исключением ее притоков (жирный шрифт – $r_i \geq 0.75$; REE – редкоземельные элементы, числитель и знаменатель – соответственно минимальные и максимальные значения r_i)

Ком- понент	<i>M</i>	Na	K	Mg	Ca	Cl	SO ₄	HCO ₃	Si	Li	Rb	Cs	Be	Sr	Ba	B	F	P _{мин}	V
<i>M</i>	1																		
Na	0.89	1																	
K	–0.60	–0.35	1																
Mg	0.99	0.88	–0.59	1															
Ca	0.99	0.86	–0.64	0.99	1														
Cl	–0.45	–0.28	0.80	–0.45	–0.48	1													
SO ₄	0.98	0.80	–0.64	0.97	0.98	–0.45	1												
HCO ₃	0.85	0.88	–0.39	0.83	0.79	–0.39	0.71	1											
Si	0.55	0.36	–0.89	0.55	0.61	–0.72	0.53	0.48	1										
Li	0.79	0.63	–0.35	0.77	0.78	–0.33	0.81	0.60	0.33	1									
Rb	–0.52	–0.30	0.90	–0.51	–0.55	0.84	–0.52	–0.45	–0.88	–0.33	1								
Cs	–0.13	–0.27	0.12	–0.17	–0.10	0.19	–0.05	–0.29	–0.04	0.35	0.02	1							
Be	–0.60	–0.48	0.87	–0.58	–0.62	0.88	–0.59	–0.53	–0.77	–0.32	0.86	0.31	1						
Sr	0.99	0.87	–0.63	0.97	0.99	–0.49	0.96	0.84	0.63	0.82	–0.57	–0.04	–0.62	1					
Ba	0.82	0.72	–0.78	0.81	0.84	–0.74	0.77	0.78	0.82	0.60	–0.81	–0.13	–0.84	0.87	1				
B	–0.34	–0.13	0.71	–0.31	–0.36	0.68	–0.36	–0.26	–0.61	–0.14	0.82	0.07	0.72	–0.36	–0.60	1			
F	0.84	0.62	–0.58	0.83	0.86	–0.44	0.81	0.72	0.62	0.76	–0.59	0.06	–0.49	0.87	0.78	–0.43	1		
P _{мин}	–0.66	–0.56	0.87	–0.65	–0.68	0.88	–0.65	–0.58	–0.78	–0.40	0.87	0.24	0.98	–0.69	–0.88	0.69	–0.54	1	
V	–0.74	–0.56	0.87	–0.73	–0.76	0.88	–0.74	–0.62	–0.80	–0.53	0.87	0.18	0.95	–0.77	–0.90	0.72	–0.68	0.96	1
Cr	–0.59	–0.46	0.78	–0.58	–0.60	0.90	–0.57	–0.54	–0.74	–0.37	0.83	0.25	0.93	–0.62	–0.83	0.64	–0.53	0.94	0.91
Ge	–0.63	–0.49	0.89	–0.61	–0.64	0.90	–0.62	–0.55	–0.82	–0.39	0.90	0.22	0.99	–0.66	–0.86	0.71	–0.54	0.99	0.96
As	–0.62	–0.45	0.93	–0.60	–0.65	0.87	–0.61	–0.53	–0.90	–0.36	0.95	0.17	0.95	–0.66	–0.88	0.75	–0.60	0.96	0.94
Se	0.41	0.35	0.07	0.36	0.40	0.08	0.42	0.29	–0.03	0.80	0.05	0.66	0.08	0.46	0.21	0.15	0.43	–0.01	–0.12
Mo	–0.19	–0.04	0.54	–0.19	–0.19	0.29	–0.31	0.07	–0.24	–0.14	0.34	–0.03	0.33	–0.16	–0.16	0.30	0.02	0.34	0.29
W	–0.80	–0.65	0.83	–0.80	–0.83	0.62	–0.80	–0.63	–0.76	–0.38	0.72	0.36	0.82	–0.79	–0.85	0.62	–0.66	0.81	0.84
Sb	0.08	0.17	0.48	0.06	0.03	0.40	0.13	–0.04	–0.62	0.35	0.55	0.28	0.38	0.03	–0.36	0.50	–0.17	0.33	0.29
Mn	–0.32	–0.24	0.40	–0.28	–0.30	0.66	–0.28	–0.41	–0.43	–0.42	0.58	–0.04	0.66	–0.38	–0.56	0.47	–0.37	0.67	0.69
Fe	–0.63	–0.49	0.84	–0.61	–0.65	0.90	–0.63	–0.53	–0.76	–0.43	0.85	0.19	0.97	–0.66	–0.86	0.67	–0.54	0.98	0.97
Co	–0.09	0.00	0.58	–0.07	–0.11	0.73	–0.11	–0.08	–0.52	–0.07	0.59	0.09	0.71	–0.15	–0.47	0.49	–0.06	0.69	0.59
Ni	–0.27	–0.20	0.78	–0.25	–0.29	0.80	–0.24	–0.32	–0.74	0.04	0.85	0.32	0.90	–0.30	–0.67	0.73	–0.25	0.87	0.77
Cu	–0.53	–0.35	0.93	–0.52	–0.54	0.78	–0.53	–0.45	–0.86	–0.29	0.93	0.11	0.83	–0.56	–0.74	0.73	–0.51	0.84	0.81
Zn	0.04	0.15	0.35	0.04	0.05	0.28	0.06	–0.05	–0.43	–0.02	0.48	–0.24	0.14	0.00	–0.12	0.32	–0.09	0.17	0.13
Cd	–0.15	0.07	0.67	–0.17	–0.17	0.48	–0.19	–0.07	–0.62	–0.07	0.65	–0.04	0.38	–0.18	–0.31	0.47	–0.23	0.40	0.36
Tl	0.03	–0.06	0.24	0.01	0.03	–0.07	0.05	0.00	–0.18	0.46	0.03	0.54	0.10	0.09	0.06	0.02	0.21	0.06	–0.06
Pb	–0.51	–0.30	0.93	–0.52	–0.54	0.74	–0.53	–0.36	–0.85	–0.29	0.88	0.10	0.76	–0.54	–0.69	0.67	–0.49	0.77	0.75
Al	–0.38	–0.48	0.32	–0.41	–0.35	0.20	–0.32	–0.42	–0.20	0.17	0.15	0.88	0.45	–0.29	–0.29	0.17	–0.08	0.40	0.34
Ga	–0.48	–0.36	0.76	–0.50	–0.49	0.77	–0.46	–0.45	–0.64	–0.09	0.68	0.64	0.86	–0.46	–0.66	0.61	–0.38	0.81	0.80
Sc	–0.56	–0.44	0.78	–0.54	–0.58	0.72	–0.62	–0.33	–0.55	–0.38	0.66	0.19	0.88	–0.56	–0.67	0.57	–0.38	0.87	0.83
Y	–0.56	–0.44	0.88	–0.55	–0.59	0.90	–0.55	–0.50	–0.82	–0.31	0.89	0.23	0.99	–0.60	–0.84	0.71	–0.49	0.98	0.95
Ti	–0.69	–0.59	0.82	–0.70	–0.71	0.77	–0.67	–0.60	–0.73	–0.33	0.73	0.45	0.93	–0.69	–0.81	0.60	–0.52	0.90	0.92
Zr	–0.68	–0.53	0.92	–0.66	–0.70	0.88	–0.67	–0.58	–0.86	–0.43	0.92	0.18	0.97	–0.71	–0.90	0.72	–0.61	0.98	0.97
Hf	–0.68	–0.55	0.89	–0.66	–0.71	0.87	–0.67	–0.59	–0.83	–0.44	0.89	0.20	0.98	–0.72	–0.90	0.71	–0.60	0.98	0.98
Th	–0.62	–0.48	0.89	–0.60	–0.64	0.89	–0.61	–0.52	–0.81	–0.38	0.88	0.22	0.98	–0.64	–0.85	0.70	–0.51	0.98	0.96
U	0.26	0.27	0.47	0.23	0.21	0.51	0.27	0.16	–0.50	0.56	0.48	0.42	0.51	0.22	–0.21	0.47	0.23	0.43	0.32
REE	–0.58	–0.46	0.85	–0.57	–0.60	0.81	–0.57	–0.51	–0.77	–0.28	0.80	0.21	0.96	–0.61	–0.84	0.65	–0.47	0.96	0.92
	–0.67	–0.57	0.90	–0.66	–0.69	0.88	–0.65	–0.59	–0.83	–0.35	0.90	0.42	0.99	–0.67	–0.87	0.73	–0.53	0.98	0.96

с разными концентрациями растворенных элементов i , а индикаторами этих составляющих служат калий, с одной стороны, и минерализация, с другой, то между коэффициентами корреляции элемент–калий r_{i-K} и элемент–минерализация r_{i-M} должна существовать обратная связь, которая, как показано на рис. 2, действительно, наблюдается:

$$r_{i-K} = 0.30 - 0.93r_{i-M}, \quad r = 0.96.$$

Подтверждением наличия в стоке р. Колымы двух генетических составляющих, одна из которых явно преобладает, можно также считать высокие коэффициенты корреляции между концентрациями растворенных химических элементов в водах Колымы и Омолона ($r = 0.98$), Колымы и Малого Анюя ($r = 0.93$), Амболихи и Пантелеихи ($r = 0.99$) при слабой аналогичной корреляции для Колымы и Амболихи ($r = 0.51$), а также для Колымы и Пантелеихи ($r = 0.49$).

Таблица 8. Окончание.

Cr	Ge	As	Se	Mo	W	Sb	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Tl	Pb	Al	Ga	Sc	Y	Ti	Zr	Hf	Th	U	REE
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.95	0.97	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
0.90	0.97	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
0.02	0.01	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27
0.15	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39	0.40	0.41	0.42	0.43	0.44	0.45	0.46	0.47	0.48	0.49	0.50	0.51	0.52	0.53	0.54	0.55	0.56	0.57	0.58
0.74	0.79	0.82	0.85	0.88	0.91	0.94	0.97	1.00	1.03	1.06	1.09	1.12	1.15	1.18	1.21	1.24	1.27	1.30	1.33	1.36	1.39	1.42	1.45	1.48	1.51
0.36	0.38	0.51	0.58	0.65	0.72	0.79	0.86	0.93	1.00	1.07	1.14	1.21	1.28	1.35	1.42	1.49	1.56	1.63	1.70	1.77	1.84	1.91	1.98	2.05	2.12
0.70	0.68	0.62	−0.30	−0.05	0.26	0.09	0.72	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.95	0.98	0.94	−0.05	0.26	0.77	0.31	0.72	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.72	0.71	0.67	0.12	0.36	0.37	0.39	0.63	0.69	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.84	0.88	0.89	0.34	0.29	0.63	0.64	0.59	0.84	0.77	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.76	0.88	0.92	0.13	0.52	0.72	0.50	0.47	0.77	0.61	0.82	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.12	0.23	0.32	0.11	0.30	0.00	0.33	0.19	0.09	0.21	0.29	0.59	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.31	0.46	0.55	0.26	0.59	0.33	0.48	0.12	0.31	0.40	0.48	0.79	0.83	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
−0.05	0.05	0.10	0.61	0.36	0.27	0.31	−0.39	−0.07	−0.01	0.22	0.27	0.21	0.39	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.67	0.81	0.88	0.13	0.60	0.71	0.50	0.37	0.71	0.56	0.74	0.97	0.60	0.86	0.31	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.31	0.36	0.31	0.50	0.17	0.60	0.16	−0.06	0.32	0.07	0.36	0.29	−0.22	0.04	0.63	0.26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.78	0.81	0.78	0.41	0.29	0.78	0.48	0.44	0.78	0.57	0.78	0.71	0.10	0.39	0.30	0.68	0.70	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.78	0.85	0.79	−0.09	0.52	0.71	0.10	0.55	0.87	0.64	0.71	0.67	−0.07	0.24	0.09	0.62	0.37	0.67	1	1	1	1	1	1	1	1
0.93	0.99	0.97	0.06	0.32	0.78	0.43	0.69	0.98	0.74	0.91	0.86	0.21	0.43	0.06	0.79	0.36	0.82	0.85	1	1	1	1	1	1	1
0.83	0.90	0.86	0.10	0.28	0.87	0.30	0.52	0.89	0.50	0.75	0.74	0.02	0.30	0.19	0.70	0.63	0.89	0.81	0.90	1	1	1	1	1	1
0.91	0.99	0.99	−0.03	0.35	0.84	0.40	0.65	0.97	0.66	0.85	0.89	0.25	0.47	0.06	0.84	0.35	0.80	0.84	0.98	0.91	1	1	1	1	1
0.92	0.99	0.97	−0.05	0.30	0.83	0.36	0.68	0.98	0.65	0.85	0.84	0.17	0.39	0.02	0.78	0.36	0.79	0.85	0.98	0.92	0.99	1	1	1	1
0.91	0.99	0.96	0.01	0.37	0.79	0.36	0.67	0.98	0.68	0.87	0.86	0.21	0.44	0.06	0.80	0.37	0.81	0.87	0.99	0.93	0.99	0.99	1	1	1
0.43	0.47	0.50	0.73	0.16	0.30	0.78	0.18	0.42	0.60	0.76	0.49	0.26	0.42	0.41	0.47	0.34	0.59	0.31	0.55	0.43	0.44	0.42	0.48	1	1
0.97	0.94	0.92	0.02	0.29	0.81	0.38	0.51	0.93	0.59	0.84	0.81	0.08	0.35	0.05	0.75	0.37	0.81	0.84	0.95	0.90	0.95	0.95	0.95	0.50	1
0.93	0.99	0.97	0.15	0.38	0.89	0.44	0.70	0.98	0.71	0.91	0.87	0.21	0.45	0.24	0.82	0.60	0.90	0.86	1.00	0.96	0.99	0.99	0.99	0.56	1

В табл. 9 выполнено нормирование средних концентраций растворенных форм микроэлементов в водах устьевых участков р. Колымы по данным наблюдений авторов в 2019–2021 гг. и опубликованных в работах [20] и [25] исследований в 2004–2006 и 2009–2021 гг. на среднее содержание соответствующих элементов в стоке рек мира и водах устьевых участков рек, протекающих в пределах Европейской (водосборы Белого и Печорского морей) и расположенной западнее водосбора р. Колымы Азиатской (водосборы

Карского моря и моря Лаптевых) территорий Российской Арктики.

Как видно на рис. 3, микроэлементный состав вод устьевых участков р. Колымы характеризуется относительным постоянством: данные разных авторов за разные периоды хорошо согласуются между собой (расхождения < 3 раз). Исключение составляют цинк, цирконий, гафний и торий, для которых расхождения средних значений достигают 5–8 раз, что может быть связано с влиянием

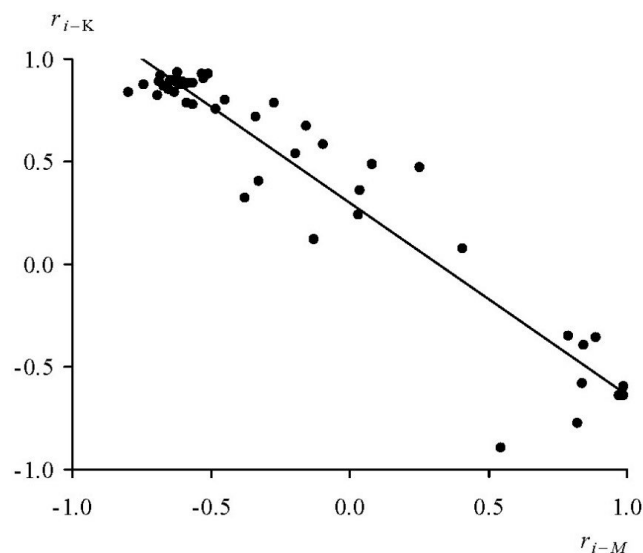


Рис. 2. Взаимосвязь между коэффициентами корреляции элемент–калий (r_{i-K}) и элемент–минерализация (r_{i-M}) в водах устьевых участков р. Колымы.

янием пространственно-временной изменчивости микроэлементного состава речных вод при относительно небольшом числе измерений. При этом следует отметить, что по сравнению со сред-

ними концентрациями растворенных микроэлементов в водах рек мира их содержание в стоке р. Колымы в большинстве случаев в несколько раз ниже. Поскольку минерализация вод р. Колымы (78.9 мг/л) не сильно отличается от среднемирового значения (85.1 мг/л [26]), указанная закономерность, по-видимому, обусловлена наложением двух факторов: уменьшения интенсивности мобилизации микроэлементов при выветривании в условиях холодного арктического климата и возрастания относительной роли сорбционных процессов.

Между средними концентрациями растворенных форм микроэлементов в водах устьевых участков р. Колымы ($C_{\text{Кол}}$, мкг/л) и рек водосборов Белого и Печорского морей ($C_{\text{БМП}}$, мкг/л), с одной стороны, а также водосборов Карского моря и моря Лаптевых ($C_{\text{КЛМ}}$, мкг/л), с другой, наблюдается тесная взаимосвязь (рис. 4), описываемая уравнениями

$$C_{\text{Кол}} = 0.32C_{\text{БМП}} \quad r = 0.82,$$

$$C_{\text{Кол}} = 0.54C_{\text{КЛМ}} \quad r = 0.94.$$

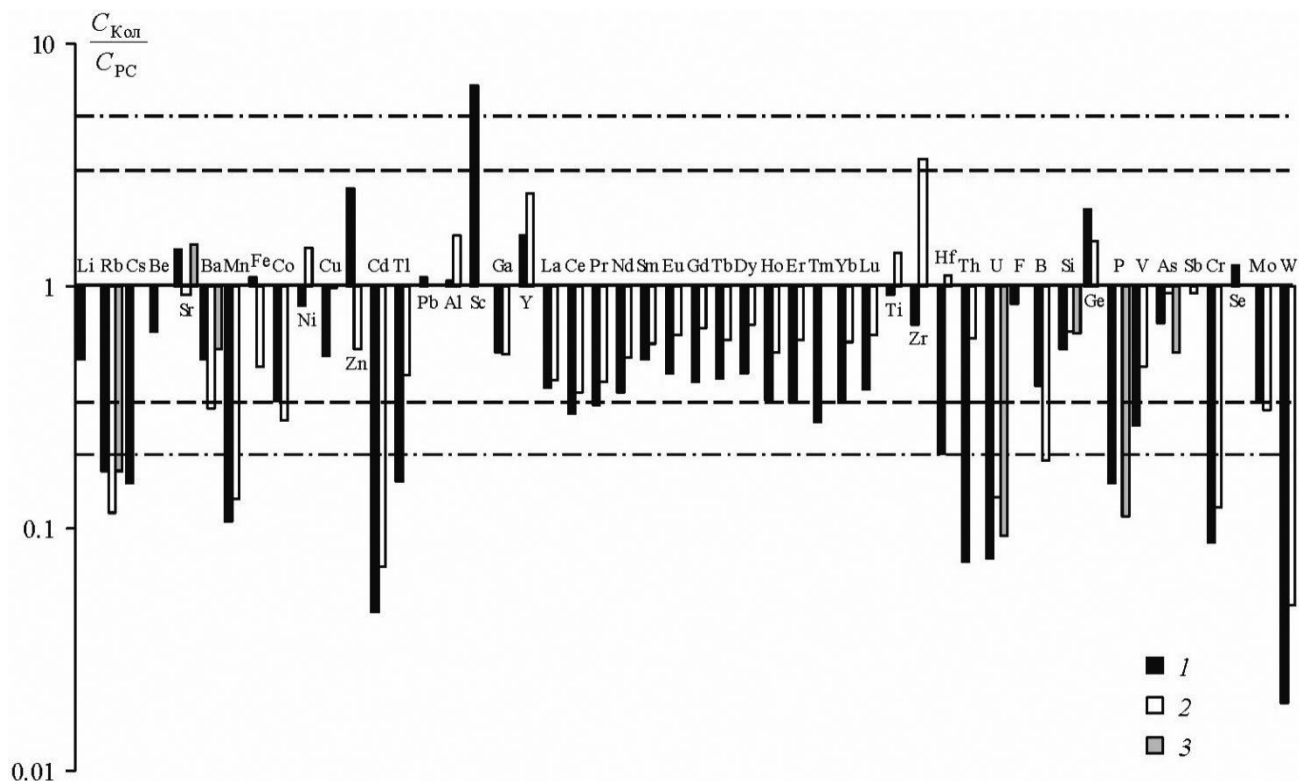


Рис. 3. Сравнение средних концентраций растворенных форм микроэлементов в водах устьевых участков р. Колымы ($C_{\text{Кол}}$: 1 – данная работа, 2 – [20], 3 – [25]) с мировым уровнем (C_{PC}). Штриховые и штрихпунктирные линии – различия соответственно в 3 и 5 раз.

Таблица 9. Средние концентрации растворенных форм микроэлементов в водах устьевых участков р. Колымы, нормированные на среднее содержание соответствующих элементов в стоке рек мира (C_{PC}) и водах устьевых участков рек водосборов Белого и Печорского морей ($C_{БПМ}$), а также Карского моря и моря Лаптевых ($C_{КЛМ}$)*

Элемент	C _{Кол}				C _{PC} **	C _{БПМ} ***	C _{КЛМ} ****	C _{Кол} /C _{PC}				C _{Кол ср} C _{БПМ}	C _{Кол ср} C _{КЛМ}
	данная работа	[20]	[25]	среднее				данная работа	[20]	[25]	среднее		
мкг/л													
Li	0.92	—	—	0.92	1.84	2.38	2.02	0.50	—	—	0.50	0.39	0.46
Rb	0.28	0.19	0.28	0.25	1.63	0.76	0.59	0.17	0.12	0.17	0.15	0.33	0.42
Cs	0.0017	—	—	0.0017	0.011	0.0024	0.0020	0.15	—	—	0.15	0.71	0.85
Be	0.0058	—	—	0.0058	0.0089	0.0074	0.0070	0.65	—	—	0.65	0.78	0.83
Sr	85.6	54.9	88.9	76.5	60	175	128	1.43	0.92	1.48	1.27	0.44	0.60
Ba	11.4	7.23	12.6	10.4	23	16.6	12.8	0.50	0.31	0.55	0.45	0.63	0.81
Mn	3.61	4.50	—	4.06	34	27.5	17.7	0.11	0.13	—	0.12	0.15	0.23
Fe	71.9	31.0	—	51.5	66	276	147	1.09	0.47	—	0.78	0.19	0.35
Co	0.050	0.041	—	0.046	0.148	0.066	0.071	0.34	0.28	—	0.31	0.69	0.64
Ni	0.67	1.15	—	0.91	0.80	1.03	0.88	0.84	1.44	—	1.14	0.88	1.03
Cu	0.76	1.45	—	1.11	1.48	1.45	1.40	0.51	0.98	—	0.75	0.76	0.79
Zn	1.52	0.33	—	0.93	0.60	7.59	2.09	2.53	0.55	—	1.54	0.12	0.44
Cd	0.0036	0.0056	—	0.0046	0.080	0.014	0.0063	0.05	0.07	—	0.06	0.33	0.73
Tl	0.0011	0.0030	—	0.0021	0.007	0.0026	0.0040	0.16	0.43	—	0.29	0.79	0.51
Pb	0.086	—	—	0.086	0.079	0.13	0.091	1.09	—	—	1.09	0.66	0.95
Al	33.8	51.5	—	42.7	32.0	39.0	37.0	1.06	1.61	—	1.33	1.09	1.15
Sc	0.027	—	—	0.027	0.004	—	—	6.75	—	—	6.75	—	—
Ga	0.016	0.016	—	0.016	0.030	0.015	0.0086	0.53	0.52	—	0.53	1.05	1.84
Y	0.065	0.096	—	0.081	0.040	0.167	0.229	1.63	2.40	—	2.01	0.48	0.35
La	0.046	0.049	—	0.047	0.120	0.137	0.248	0.38	0.41	—	0.40	0.35	0.19
Ce	0.078	0.096	—	0.087	0.262	0.233	0.412	0.30	0.36	—	0.33	0.37	0.21
Pr	0.013	0.016	—	0.015	0.040	0.039	0.063	0.33	0.40	—	0.36	0.37	0.23
Nd	0.055	0.077	—	0.066	0.152	0.177	0.241	0.36	0.51	—	0.43	0.37	0.27
Sm	0.018	0.021	—	0.020	0.036	0.035	0.050	0.50	0.58	—	0.54	0.56	0.39
Eu	0.0043	0.0062	—	0.0053	0.0098	0.01	0.011	0.44	0.63	—	0.54	0.53	0.48
Gd	0.016	0.027	—	0.022	0.040	0.038	0.054	0.40	0.68	—	0.54	0.57	0.40
Tb	0.0023	0.0033	—	0.0028	0.0055	0.0057	0.0071	0.42	0.60	—	0.51	0.49	0.39
Dy	0.013	0.021	—	0.017	0.030	0.031	0.042	0.43	0.70	—	0.57	0.55	0.40
Ho	0.0024	0.0038	—	0.0031	0.0071	0.0058	0.0082	0.34	0.54	—	0.44	0.53	0.38
Er	0.0066	0.012	—	0.0093	0.020	0.016	0.024	0.33	0.60	—	0.47	0.58	0.39
Tm	0.0009	—	—	0.0009	0.0033	0.0022	0.0046	0.27	—	—	0.27	0.41	0.20
Yb	0.0056	0.010	—	0.0078	0.017	0.014	0.021	0.33	0.59	—	0.46	0.56	0.37
Lu	0.0009	0.0015	—	0.0012	0.0024	0.0021	0.0032	0.38	0.63	—	0.50	0.57	0.38
Ti	0.45	0.67	—	0.56	0.49	0.82	0.49	0.92	1.37	—	1.14	0.68	1.14
Zr	0.027	0.130	—	0.079	0.039	0.137	0.159	0.69	3.33	—	2.01	0.57	0.49
Hf	0.0012	0.0065	—	0.0039	0.0059	0.0057	0.0100	0.20	1.10	—	0.65	0.68	0.39
Th	0.003	0.025	—	0.014	0.041	0.014	0.052	0.07	0.61	—	0.34	1.00	0.27
U	0.028	0.050	0.035	0.038	0.372	0.143	0.266	0.08	0.13	0.09	0.10	0.26	0.14
F	84.9	—	—	84.9	100	109	115	0.85	—	—	0.85	0.78	0.74
B	3.98	1.94	—	2.96	10.2	19.7	10.3	0.39	0.19	—	0.29	0.15	0.29
Si	2240	2640	2600	2493	4070	3030	2680	0.55	0.65	0.64	0.61	0.82	0.93
Ge	0.014	0.011	—	0.012	0.0068	0.014	0.0094	2.06	1.54	0.00	1.80	0.88	1.30
P _{мин}	5.8	—	4.3	5.1	38	17.0	24.2	0.15	—	0.11	0.13	0.30	0.21
V	0.19	0.33	—	0.26	0.71	0.41	0.79	0.27	0.46	—	0.37	0.63	0.33
As	0.44	0.58	0.33	0.45	0.62	0.7	0.47	0.71	0.94	0.53	0.73	0.64	0.96
Sb	0.070	0.065	—	0.068	0.07	0.038	0.049	1.00	0.93	—	0.96	1.78	1.38
Cr	0.061	0.085	—	0.073	0.7	0.27	0.22	0.09	0.12	—	0.10	0.27	0.33
Se	0.085	—	—	0.085	0.07	0.046	0.031	1.21	—	—	1.21	1.85	2.74
Mo	0.14	0.13	—	0.14	0.42	0.26	0.36	0.33	0.31	—	0.32	0.52	0.38
W	0.0019	0.0048	—	0.0034	0.10	0.0053	0.0078	0.02	0.05	—	0.03	0.63	0.43

Примечания см. на следующей странице.

Примечания к табл. 9.

* Прочерк означает отсутствие данных.

** F [3], Si [26], P_{мин} [14], другие микроэлементы [17].

*** Средние концентрации для рек Кандалакшского залива, Онеги, Кянды, Северной Двины, Кулоя, Мезени и Сёмжи — по данным [13, 16 с дополнениями] и Печоры — по данным [15] с учетом соотношения долей среднегогодового водного стока рек, согласно [7, 24 с дополнениями].

**** Средние концентрации для рек Оби [6, 12, 18, 20–22, 25, 32], Пура [29], Таза [28, 29], Енисея [11, 18, 20, 21, 25] и Лены [4, 20, 25, 31, 34] с учетом соотношения долей среднегогодового водного стока рек, согласно [24].

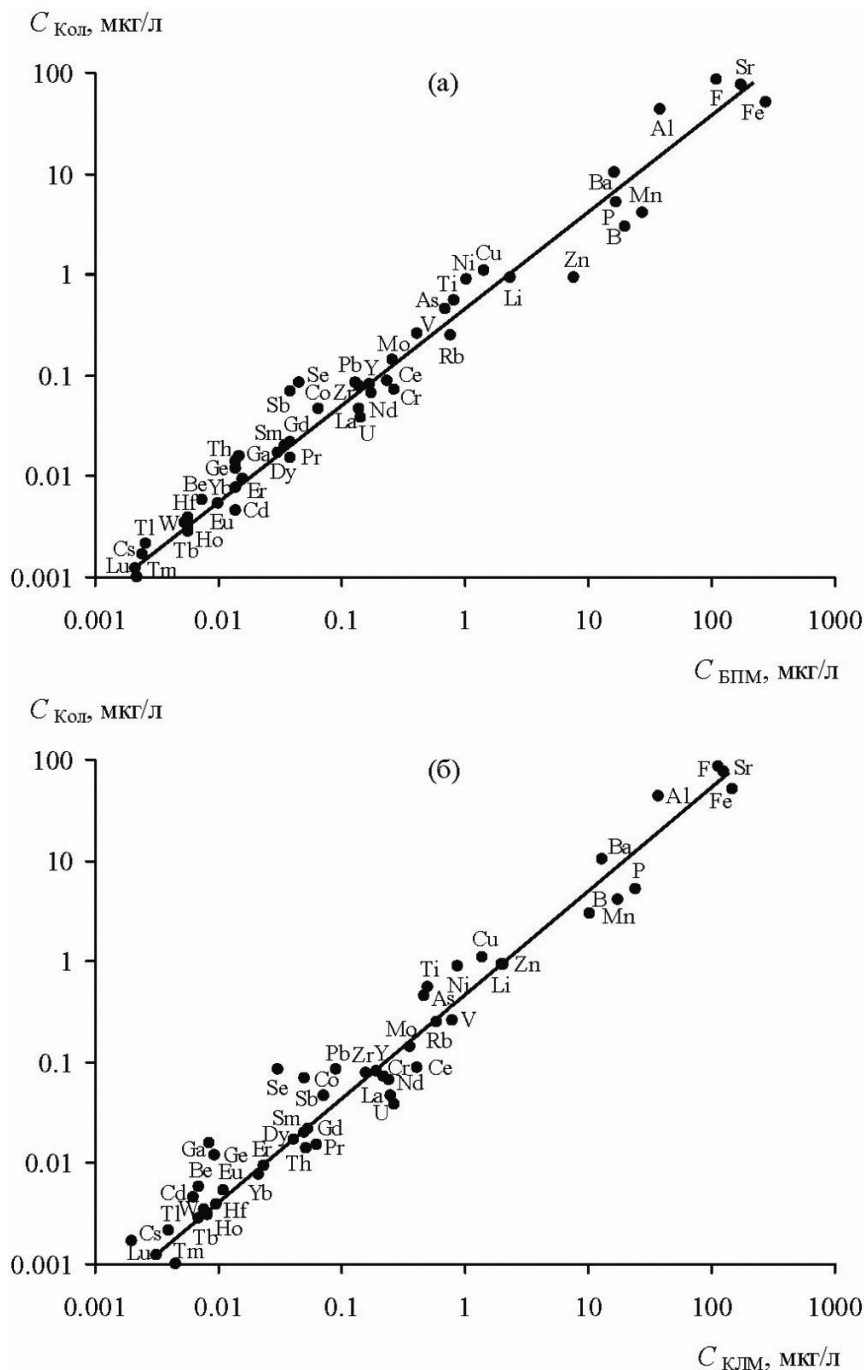


Рис. 4. Взаимосвязь средних концентраций растворенных форм микроэлементов в водах устьевых участков р. Колымы ($C_{\text{Кол}}$) и: (а) рек водосборов Белого и Печорского морей ($C_{\text{БПМ}}$), (б) рек Карского моря и моря Лаптевых ($C_{\text{КЛМ}}$) с учетом соотношения объемов их среднегогодового водного стока, согласно [7, 24 с дополнениями].

Таблица 10. Средние величины минерализации и концентраций главных ионов в водах устьевого участка р. Колымы во время съёмки 2019–2021 гг., нормированные на среднее содержание соответствующих компонентов в стоке рек мира (C_{PC}) и водах устьевых участков крупных рек водосборов Белого и Печорского морей ($C_{БПМ}$), а также Карского моря и моря Лаптевых ($C_{КЛМ}$)

Элемент	$C_{Кол}$	C_{PC}^*	$C_{Онега}$	$C_{Сен-Дв.}$	$C_{Мезень}$	$C_{Печора}$	$C_{БПМ}^{**}$	$C_{Обь}$	$C_{Таза}$	$C_{Енисей}$	$C_{Хатанга}$	$C_{Лена}$	$C_{КЛМ}^{***}$	$\frac{C_{Кол}}{C_{PC}}$	$\frac{C_{Кол}}{C_{БПМ}}$	$\frac{C_{Кол}}{C_{КЛМ}}$
М	78.9	85.1	176	192	125	105	142	122	101	111	116	114	114	0.93	0.55	0.69
Na (Na + K)	2.12	5.52	3.80	7.60	8.50	5.90	6.97	4.20	3.72	6.30	10.0	10.0	7.10	0.38	0.30	0.30
К	0.51	1.72	—	—	—	0.66	—	1.80	0.51	1.00	4.00	1.70	1.55	0.30	—	0.33
Mg	4.16	2.98	8.40	8.70	4.90	3.90	5.97	5.05	5.64	3.50	4.60	4.40	4.27	1.40	0.70	0.98
Ca	13.3	11.9	30.5	33.9	18.0	16.0	23.4	18.8	13.1	16.2	15.1	16.0	16.6	1.12	0.57	0.80
Cl	0.23	5.92	4.10	5.90	5.40	4.90	5.27	8.20	0.80	9.70	17.0	17.1	11.8	0.04	0.04	0.02
SO ₄	30.8	8.40	32.7	38.4	8.00	7.70	20.2	6.60	1.69	18.4	4.70	12.3	12.5	3.67	1.53	2.46
HCO ₃	27.8	48.7	96.0	97.7	79.7	66.1	80.4	77.2	75.7	56.2	60.1	52.0	60.5	0.57	0.35	0.46

* [26].

** Средние концентрации для рек Онеги за 1943–1966 и 1976–1985 гг., Северной Двины за 1885–1985 и 2007–2008 гг., Мезени за 1920–1989 гг. [5] (обобщение данных [2, 10, 19, 30, 33]) и Печоры за 2016–2019 гг. [15] с учетом соотношения долей среднегогодового водного стока рек, согласно [24].

*** Средние концентрации для рек Оби за 1955–1990 гг., Енисея за 1952–1990 гг. [19, 33], Таза за 2015–2020 гг. [28], Хатанги и Лены за 1980–1990 гг. [19] с учетом соотношения долей среднегогодового водного стока рек, согласно [24].

Угловые коэффициенты этих зависимостей показывают, что в водах р. Колымы, дренирующей самый восточный водосбор Российской Арктики, концентрации растворенных микроэлементов в целом в 3.1 раза ниже по сравнению с речным стоком с водосборов Белого и Печорского морей, относящихся к Европейской арктической зоне, и в 1.8 раза ниже, чем в стоке с расположенной западнее водосбора р. Колымы части ее Азиатской территории (с водосборов Карского моря и моря Лаптевых).

Сходная картина наблюдается и для минерализации. Согласно приведенным в табл. 10 данным, величины отношений минерализации вод р. Колымы к среднемноголетней минерализации вод устьевых участков крупных рек водосборов Белого и Печорского морей ($M_{Кол}/M_{БПМ}$), а также Карского моря и моря Лаптевых ($M_{Кол}/M_{КЛМ}$) равны соответственно 0.55 и 0.69. Отсюда следует, что как для микроэлементного, так и для ионного состава речного стока с арктических территорий России прослеживается тенденция к снижению концентраций с запада на восток, т. е. с усилением суровости климата и увеличением распространенности сплошной многолетней мерзлоты на водосборах. Большую амплитуду изменения концентраций растворенных микроэлементов относительно таковой для минерализации можно связать со значительным влиянием на их подвижность сорбционной иммобилизации.

ВЫВОДЫ

Концентрации растворенных форм большинства химических элементов в водах устьевого участка р. Колымы близки к средним концентрациям в мировом речном стоке, отличаясь от них в пределах 2–5 раз. Более чем в 5 раз пониженные концентрации по сравнению со среднемировым уровнем наблюдаются для рубидия, цезия, марганца, кадмия, таллия, тория, урана, фосфора, хрома и вольфрама, а более чем в 5 раз повышенные — только для скандия.

В макро- и микроэлементном составе речной водной массы выделяются две генетические составляющие, одна из которых объединяет воды р. Колымы и ее притоков Омолона и Малого

Анюя, а другая включает воды нижних правых притоков Амболихи и Пантелеихи.

В водах р. Колымы, дренирующей самый восточный водосбор Российской Арктики, минерализация и концентрации растворенных микроэлементов в целом соответственно в 1.8 и 3.1 раза ниже, чем в речном стоке с входящих в Европейскую арктическую зону водосборов Белого и Печорского морей и соответственно в 1.4 и 1.8 раза ниже, чем в стоке с расположенных в западной части Азиатской арктической зоны водосборов Карского моря и моря Лаптевых.

Авторы выражают признательность Н.С. Зимову за создание прекрасных условий для успешного проведения экспедиционных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алекин О.А., Бражникова Л.В.* Сток растворенных веществ с территории СССР. М.: Наука, 1964. 144 с.
2. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР.* Т. 2. Белое море. Вып. 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 192 с.
3. *Гордеев В.В.* Геохимия системы река—море. М., 2012. 452 с.
4. *Гордеев В.В.* Микроэлементы в воде, взвеси и донных осадках Обской губы, Енисейского залива и дельты Лены и прилегающих областей Карского моря и моря Лаптевых // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. М.: Изд-во Московского ун-та, 2009. С. 202–224.
5. *Гордеев В.В., Филиппов А.С., Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н., Покровский О.С., Шевченко В.П., Дара О.М.* Особенности геохимии речного стока в Белое море // Система Белого моря. Т. 2. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М.: Науч. мир, 2012. С. 225–308.
6. *Демина Л.Л., Гордеев В.В., Галкин С.В., Кравчишина М.Д., Алексанкина С.П.* Биогеохимия некоторых тяжелых металлов и металлоидов на разрезе эстуарий реки Обь — Карское море // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 771–784.
7. *Иванов В.В., Брызгалов В.А.* Гидролого-гидрохимический режим водосбора Белого моря // Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 119–145.
8. *Магрицкий Д.В., Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Ефимов В.А., Василенко А.Н., Сазонов А.А., Ефимова Л.Е.* Гидрологические условия в устье реки Колымы летом 2019 года // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, География. 2022. № 1. С. 134–151.
9. *Михайлов В.Н.* Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
10. *Ресурсы поверхностных вод СССР.* Т. 3. Северный край. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 664 с.
11. *Савенко А.В., Покровский О.С.* Распределение растворенных веществ в эстуарии Енисея и на прилегающей акватории Карского моря и его межгодовая изменчивость // Геохимия. 2019. Т. 64. № 11. С. 1175–1186.
12. *Савенко А.В., Савенко В.С., Ефимов В.А.* Современное содержание фтора в водах реки Оби // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, География. 2023. Т. 78. № 6. С. 132–138.
13. *Савенко А.В., Савенко В.С., Покровский О.С.* Новые данные по содержанию растворенных микроэлементов в водах рек Российской Арктики // ДАН. Науки о Земле. 2020. Т. 491. № 2. С. 82–88.
14. *Савенко В.С., Савенко А.В.* Геохимия фосфора в глобальном гидрологическом цикле. М.: ГЕОС, 2007. 248 с.
15. *Chupakov A.V., Pokrovsky O.S., Moreva O.Y., Kotova E.I., Vorobyeva T.Y., Shirokova L.S.* Export of organic carbon, nutrients and metals by the mid-sized Pechora River to the Arctic Ocean // Chem. Geol. 2023. V. 632. № 121524.
16. *Chupakov A.V., Pokrovsky O.S., Moreva O.Y., Shirokova L.S., Neverova N.V., Chupakova A.A., Kotova E.I., Vorobyeva T.Y.* High resolution multi-annual riverine fluxes of organic carbon, nutrient and trace element from the largest European Arctic river, Severnaya Dvina // Chem. Geol. 2020. V. 538. № 119491.
17. *Gaillardet J., Viers J., Dupre B.* Trace elements in river waters // Treatise on Geochemistry (Second Edition). V. 7. Amsterdam et al.: Elsevier, 2014. P. 195–235.
18. *Gordeev V.V., Beeskov B., Rachold V.* Geochemistry of the Ob and Yenisey estuaries: A comparative study. Berichte zur Polar- und Meeresforschung. 2007. V. 565. 235 p.
19. *Gordeev V.V., Martin J.M., Sidorov I.S., Sidorova M.V.* A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean // Amer. J. Sci. 1996. V. 296. № 6. P. 664–691.

20. Gordeev V.V., Pokrovsky O.S., Zhulidov A.V., Filippov A.S., Gurtovaya T.Y., Holmes R.M., Kosmenko L.S., McClelland J.W., Tank S.E. Dissolved major and trace elements in the largest Eurasian Arctic rivers: Ob, Yenisey, Lena, and Kolyma // *Water*. 2024. V. 16. № 2, 316.
21. Guay C.K.H., Zhulidov A.V., Robarts R.D., Zhulidov D.A., Gurtovaya T.Yu., Holmes R.M., Headley J.V. Measurements of Cd, Cu, Pb and Zn in the lower reaches of major Eurasian arctic rivers using trace metal clean techniques // *Environ. Pollut.* 2010. V. 158. № 2. P. 624–630.
22. Kolesnichenko I., Kolesnichenko L.G., Vorobyev S.N., Shirokova L.S., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Vorobev R.S., Shavrina U., Kirpotin S.N., Pokrovsky O.S. Landscape, soil, lithology, climate and permafrost control on dissolved carbon, major and trace elements in the Ob River, Western Siberia // *Water*. 2021. V. 13. № 22, 3189.
23. Livingstone D.A. Chemical composition of rivers and lakes // *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 1963. V. 440G. 64 p.
24. Magritsky D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Pakhomova O.M. Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector // *Polarforschung*. 2018. V. 87. № 2. P. 177–194.
25. McClelland J.W., Tank S.E., Spencer R.G.M., Shiklomanov A.I., Zolkos S., Holmes R.M. Arctic Great Rivers Observatory. Water Quality Dataset. 2023. Version 20230314. <https://arcticgreatrivers.org/data>
26. Meybeck M. Global occurrence of major elements in rivers // *Treatise on Geochemistry*. V. 5. Amsterdam: Elsevier–Pergamon, 2004. P. 207–223.
27. Meybeck M. Pathways of major elements from land to ocean through rivers // *River Inputs to Ocean Systems*. N.Y.: United Nations, 1981. P. 18–30.
28. Pokrovsky O.S., Manasyrov R.M., Chupakov A.V., Kopysov S.G. Element transport in the Taz River, western Siberia // *Chem. Geol.* 2022. V. 614. № 121180.
29. Pokrovsky O.S., Manasyrov R.M., Loiko S.V., Krickov I.A., Kopysov S.G., Kolesnichenko L.G., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N. Trace element transport in western Siberian rivers across a permafrost gradient // *Biogeosci.* 2016. V. 13. № 6. P. 1877–1900.
30. Pokrovsky O.S., Viers J., Shirokova L.S., Shevchenko V.P., Filippov A.S., Dupre B. Dissolved, suspended, and colloidal fluxes of organic carbon, major and trace elements in the Severnaya Dvina River and its tributary // *Chem. Geol.* 2010. V. 273. № 1–2. P. 136–149.
31. Savenko A.V., Savenko V.S., Efimov V.A. Fluorine concentrations in the Lena R. water from 1995 to 2021 // *Water Resour.* 2023. V. 50. Suppl. 2. P. S172–S176.
32. Soromotin A., Moskovchenko D., Khoroshavin V., Prikhodko N., Puzanov A., Kirillov V., Koveshnikov M., Krylova E., Krasnenko A., Pechkin A. Major, trace and rare earth element distribution in water, suspended particulate matter and stream sediments of the Ob River mouth // *Water*. 2022. V. 14. № 15, 2442.
33. Tsirkunov V.V., Polkanov M.P., Drabkova V.G. Natural composition of surface water and groundwaters // *A Water Quality Assessment of the Former Soviet Union*. L.-N.Y.: E and FN Spon, 1998. P. 25–68.
34. Vorobyev S.N., Kolesnichenko Y., Korets M.A., Pokrovsky O.S. Testing landscape, climate and lithology impact on carbon, major and trace elements of the Lena River and its tributaries during a spring flood period // *Water*. 2021. V. 13. № 15, 2093.

HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF WATERS OF THE MOUTH SECTION OF THE KOLYMA RIVER IN THE MODERN PERIOD

A. V. Savenko^{a, *}, V. S. Savenko^a, V. A. Efimov^a, O. S. Pokrovskii^{b, c}

^aMoscow State University, Moscow, 119991 Russia

^bNational Research Tomsk State University, Tomsk, 634050 Russia

^cInstitute of Environmental Problems of the North, Ural Division, Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, 163000 Russia

**e-mail: Alla_Savenko@rambler.ru*

New data on the concentrations of ions of the main salt composition and dissolved traceelements in the waters of the mouth section of the Kolyma River and its lower tributaries (the Omolon, Maly Anyuy, Ambolikha and Panteleikha) during the decline of the spring–summer flood and summer–autumn low water are presented. Arguments are given proving the presence of two genetic components in the waters of the mouth part of the Kolyma River, which have different macro- and traceelement composition. A regular change in the TDS and traceelement composition of river runoff into the seas of the Russian Arctic from west to east is shown, presumably associated with an increase in the prevalence of permanent permafrost in catchment areas in this direction.

Keywords: traceelements, dissolved forms, river waters, Kolyma, Russian Arctic.