

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-15-27>
УДК 504.064.36:550.424:556.531

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ШАГАН (ОТ АТОМНОГО ОЗЕРА ДО РЕКИ ИРТЫШ)

М.Т. Дюсембаева, А.Ж. Ташекова*, Н.В. Ларионова, С.Е. Сальменбаев, С.Д. Смирнов, Н.К. Нургайсинова

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

** E-mail для контактов: zhymanova.13@mail.ru*

В работе представлены результаты исследования валового содержания микроэлементов и распределения их по формам нахождения в донных отложениях нижнего течения реки Шаган. Проанализировано 20 проб, отобранных в десяти створах на участке от выхода реки из Атомного озера до впадения в реку Иртыш. Распределение валового содержания элементов вдоль русла характеризуется выраженной неоднородностью. Для Li, Al, Cr, La, Ce и Mn локальные максимумы преимущественно отмечены на участке 66–96 км. Для Ga и Ba повышенные содержания характерны для начальной части обследованного отрезка, тогда как U и Mo характеризуются несколькими разобщёнными максимумами. Установлено распределение микроэлементов между шестью операционно определяемыми фракциями: водорастворимой, обменной, слабоспецифически сорбированной, связанной с органическим веществом, связанной с оксидами и гидроксидами железа и марганца и остаточной. Валовое содержание большинства элементов, за исключением Ga, ниже их кларковых значений в верхней части континентальной коры. Суммарная доля элементов, извлекаемых H_2O , $Ca(NO_3)_2$ и NaOH, составляет менее 20%. Для многих исследуемых элементов более 70% валового содержания сосредоточено в труднорастворимых формах.

Ключевые слова: донные отложения, формы нахождения элементов, микроэлементы, Атомное озеро, нижнее течение, река Шаган.

ВВЕДЕНИЕ

Река Шаган является левобережным притоком Иртыша и пересекает восточную часть территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Сама река не образует отдельную речную систему площадки «Балапан»; с этой площадкой связан лишь участок её течения в районе проведения подземных ядерных испытаний. В результате промышленного ядерного взрыва с выбросом грунта, проведённого 15 января 1965 г. в месте слияния рек Шаган и Ащису, был образован искусственный водоём Атомное озеро [1–3].

Площадь водосборного бассейна реки Шаган составляет около 10 000 км². Общая протяжённость основного русла достигает 275 км, тогда как длина одного из её крупнейших притоков – реки Ащису – составляет приблизительно 115 км. Река берёт начало на склонах хребта Канчингиз (система Чингизтау). В пределах территории СИП длина русла реки составляет около 50 км. Питание реки Шаган и её притоков преимущественно снеговое, при этом в верхних участках водосбора заметную роль играют грунтовые воды, что определяет выраженную сезонность водного режима. В верхнем течении вода характеризуется пресным составом, однако после впадения притока Ащису отмечается увеличение минерализации, вследствие чего вода приобретает солоноватый характер. Русло реки отличается сравнительно небольшой скоростью течения и наличием многочисленных разветвлений,

тупиковых заводей и участков с заболачиванием берегов. Особенностью рассматриваемого водотока является периодическое исчезновение поверхностного стока на отдельных участках. Так, на расстоянии примерно от 12–15 до 30–40 км ниже Атомного озера русло реки Шаган местами пересыхает, после чего вновь появляется ниже по течению [2].

В настоящее время в долине реки Шаган осуществляется круглогодичный выпас отар овец и табунов лошадей, а также заготовка сена. Вода реки Шаган из-за высокого солесодержания не используется местным населением для питьевых целей, но река является местом водопоя сельскохозяйственных животных. В верховьях реки находится около 30 зимовок для скота. Следует отметить, что в 20 километрах от русла реки Шаган функционирует угольный разрез «Каражыра», продукция которого поставляется на электростанции и предприятия России, Казахстана и Киргизии.

Донные отложения (ДО) являются объектом депонирования химических элементов и отражают накопленное за длительный период загрязнение. Изучение химического состава ДО позволяет оценить геохимическую картину содержания, распределения и переноса элементов в водной среде, исследовать вариативность форм нахождения элементов в различных соединениях, определить способность химических элементов к миграции, осаждению и биоаккумуляции. Скопление химических элементов, особенно тяжёлых металлов и токсичных соединений, в донных осадках

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ШАГАН (ОТ АТОМНОГО ОЗЕРА ДО РЕКИ ИРТЫШ)

может негативно влиять на качество воды за счёт возможного вторичного загрязнения, обусловленного высвобождением микроэлементов из осадков в воду.

Цель работы – определить валовое содержание микроэлементов, установить их формы нахождения и выявить особенности изменения содержания вдоль русла в донных отложениях нижнего течения реки Шаган на участке от Атомного озера до реки Иртыш.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

В нижнем течении реки Шаган отобрано 20 проб донных отложений в десяти створах на участке от выхода русла из Атомного озера до места впадения в реку Иртыш (рисунок 1). Отсчёт расстояний по руслу в настоящей работе ведётся от выхода реки из Атомного озера, а не от географического истока реки.

Точки отбора выбраны по маршрутно-систематическому принципу, который заключался в последовательном размещении створов вдоль всей обследуемой протяжённости русла с учётом доступности участков устойчивого накопления тонкодисперсного донного материала. В каждом из десяти створов отбирали по две пробы. Такая схема позволила сопоставить верхнюю часть обследуемого отрезка, среднюю зону с повышенной извилистостью русла и нижнюю приустьевую часть. Участки выше Атомного озера и русло в пределах площадки «Балапан» в данное исследование не включались; поэтому работа характеризует современное состояние нижнего течения, но не претендует на оценку трансформации всей геосистемы реки вследствие ядерных испытаний.

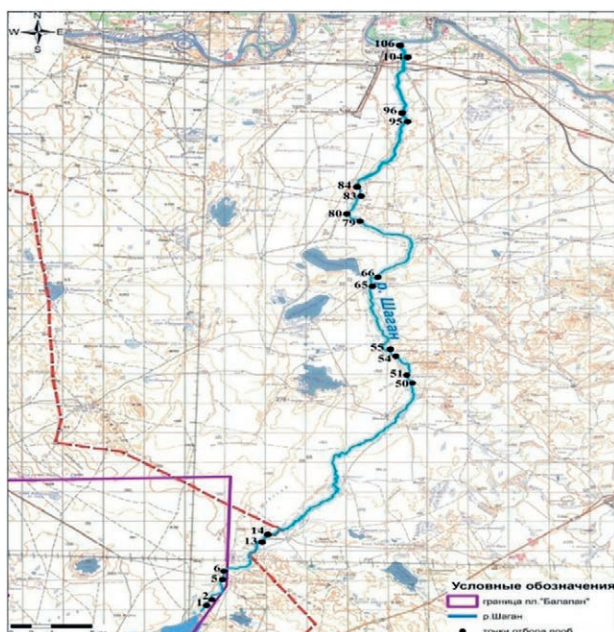


Рисунок 1. Расположение точек отбора проб донных отложений в нижнем течении реки Шаган. Фиолетовой линией показана граница площадки «Балапан»

Отбор проб

Пробы отбирали методом укола из поверхностного слоя донных отложений 0–5 см на площади 100 см² согласно ГОСТ 17.1.5.01-80 «Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязнённость». Пробы высушивали естественным путём при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния, затем просеивали через полиамидное сито с диаметром отверстий 1 мм. Из гомогенизированного материала методом многократного квартования отбирали навеску массой 5 г для последовательного экстрагирования.

Подготовка проб

В настоящее время для определения форм нахождения химических элементов в донных осадках применяется широкий спектр схем последовательного экстрагирования. Данный метод основан на поэтапном выделении различных форм элементов из одной навески пробы с использованием серии экстрагентов возрастающей химической активности от наиболее мягких реагентов к более сильным.

В соответствии с применённой схемой последовательного экстрагирования содержание элементов определяли в шести операционно выделяемых фракциях: водорастворимой, обменной, слабоспецифически сорбированной, связанной с органическим веществом, ассоциированной с оксидами и гидроксидами железа и марганца, а также остаточной [4–7].

В ходе последовательного экстрагирования образцы подвергаются обработке различными селективными растворителями, обеспечивающими постепенное извлечение элементов из всё более устойчивых фаз, вплоть до их высвобождения из кристаллической решётки минералов. В качестве селективных экстрагентов использовались реактивы, предложенные рядом исследователей [4, 5], перечень которых приведён в таблице 1.

Таблица 1. Формы нахождения элементов в донных осадках и соответствующие условия их выделения

№ п/п	Название формы соединений	Экстрагент	Условное обозначение	Время
1	Водорастворимая	H ₂ O	ХЭводн.	1 час
2	Обменная	0,1М Ca(NO ₃) ₂	ХЭобмен.	1 час
3	Слабо специфически сорбированная	3% CH ₃ COOH	ХЭсп.сорб.	1 час
4	Связанная с органическим веществом	0,1М NaOH	ХЭорг.	1 час
5	Связанная с оксидами/гидроксидами железа и марганца (осадочная форма)	Тамма (0,2М (NH ₄) ₂ (C ₂ O ₄) + 0,2МC ₂ H ₂ O ₄)	ХЭокс/гидрокс Fe и Mn	1 час в темноте
6	Остаточная	HF (конц.) + 7М HNO ₃	ХЭост.	-

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ШАГАН (ОТ АТОМНОГО ОЗЕРА ДО РЕКИ ИРТЫШ)

Соотношение «донные осадки / экстрагент» составляло 1:10 при времени воздействия 1 час с перемешиванием на ротаторе. После экстракции жидкую фазу отделяли центрифугированием в течение 10 минут при скорости 4000–6000 об/мин, после чего остаток промывали дистиллированной водой.

Количественное определение химических элементов в выделенных фракциях выполняли методом ICP-MS на квадрупольных масс-спектрометрах Agilent 7700x и Elan 9000, а также методом ICP-AES на спектрометре iCAP 6300 Duo. Анализ проб донных от-

ложений проводили в соответствии с методикой ISO 17294-2:2019.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные сопоставляли с кларками элементов в верхней части континентальной коры по Григорьеву [8], а также с их предельно допустимыми концентрациями в почве [9]. Валовое содержание и содержание элементов в выделенных формах в донных отложениях реки Шаган представлены в таблице 2.

Таблица 2. Распределение элементов по формам в донных осадках реки Шаган (последовательное экстрагирование), мг/кг

Элемент	Формы соединений						Валовое содержание	ПДК в почве [9]	Кларк [8]
	MeXЭводн. min-max	MeXЭобм. min-max	MeXЭсп.срб. min-max	MeXЭорг. min-max	MeXЭокс/гидрокс Fe и Mn. min-max	MeXЭост. min-max			
Li	0,030 0,01–0,31	0,08 0,02–0,25	0,10 0,03–0,83	0,03 0,01–0,09	0,26 0,10–1,6	4,8 4,3–11,2	5,3	–	30
Be	<0,0001	<0,0001	0,03 0,02–0,11	0,0006	0,05 0,02–0,13	0,97 0,87–1,17	1,06	–	2,1
Mg	87 30–380	105 88–540	210 9,7–1300	29 22–230	134 46–437	1040 600–2100	1600	–	17700
Al	1,20 0,15–6,25	1,4 0,3–3,2	45,0 4,5–134,0	3,6 1,3–26,0	220 84–1030	13070 10700–18300	13300	–	76000
Sc	0,0010 0,0004–0,0020	0,005 0,004–0,008	0,020 0,006–0,090	0,009	0,25 0,08–0,73	0,99 0,70–1,80	1,27	–	15
V	0,020 0,008–0,040	0,006 0,002–0,010	0,19 0,05–2,30	0,49 0,03–0,73	7 1–19	48 33–79	55	150	120
Cr	<0,001	0,017 0,016–0,019	0,15 0,03–0,81	<0,001	1,6 0,3–4,5	19 13–57	21	200	150
Mn	0,7 0,1–5,4	3,6 0,6–29,0	79 16–1750	0,4 0,1–88,0	60 13–280	144 86–260	288	1500	670
Fe	0,8 0,1–3,9	0,8 0,3–1,5	94 9–820	3,5 0,9–31,0	2500 345–6560	15600 10600–27200	18200	–	40600
Co	0,0023 0,0005–0,0280	0,0050 0,0003–0,0220	0,50 0,05–2,60	0,019 0,003–0,080	1,1 0,4–3,1	2,8 1,7–5,6	4,4	100	17
Ni	0,019 0,003–0,080	0,020 0,003–0,073	0,6 0,3–3,1	0,025 0,007–0,090	1,3 0,5–4,3	7,4 4,6–21,0	9,3	100	62
Cu	0,030 0,015–0,210	0,011 0,001–0,060	0,59 0,15–1,1	0,15 0,04–0,43	1,6 0,6–6,3	12 8–15	14	100	39
Zn	0,040 0,009–0,120	0,10 0,03–0,34	0,54 0,25–2,1	<0,001	1,8 0,6–7,2	14 9–20	16	300	78
Ga	0,005 0,002–0,020	<0,0001	1,6 0,9–4,0	0,03 0,01–0,48	0,7 0,4–1,5	33 22–42	35	–	19
Ge	0,0007 0,0002–0,0020	0,0010 0,0002–0,0030	0,02 0,01–0,14	<0,0001	0,16 0,04–0,40	1,1 0,7–2,4	1,3	–	1,4
As	0,02 0,01–0,05	0,004 0,001–0,010	0,10 0,06–0,60	0,20 0,01–0,80	1,6 0,5–5,1	2,9 1,9–5,8	4,8	20	6,5
Rb	0,006 0,003–0,013	0,003 0,001–0,014	0,013 0,010–0,026	0,010 0,005–0,026	0,04 0,03–0,40	6,3 2,6–10,8	6,3	–	110
Sr	3,6 1,0–23,3	8 3–41	28 7–232	0,9 0,3–12,0	0,5 0,3–0,6	112 43–174	153	–	270
Mo	0,045 0,006–0,370	0,015 0,003–0,100	0,003 0,002–0,012	0,07 0,01–0,48	0,25 0,10–2,60	0,46 0,35–0,70	0,84	50,0	1,5
Cd	0,0003 0,00020–0,00060	0,0007 0,0004–0,0027	0,02 0,01–0,11	0,0004 0,0002–0,0031	0,008 0,004–0,081	0,07 0,05–0,13	0,10	3,0	0,3

**ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ШАГАН
(ОТ АТОМНОГО ОЗЕРА ДО РЕКИ ИРТЫШ)**

Элемент	Формы соединений						Валовое содержание	ПДК в почве [9]	Кларк [8]
	МеХЭводн. min-max	МеХЭобм. min-max	МеХЭсп.сorb. min-max	МеХЭорг. min-max	МеХЭокс/гидрокс Fe и Mn. min-max	МеХЭост. min-max			
Cs	0,0003 0,0002–0,0007	<0,0001	<0,0001	0,0003 0,0002–0,0017	0,002 0,001–0,010	0,14 0,09–0,45	0,14	–	4
Ba	0,14 0,06–0,65	<0,01	22 2–61	0,9 0,4–14,0	15 10–39	542 274–691	580	–	510
La	0,0004 0,0002–0,0012	<0,0001	0,3 0,1–2,1	0,0030 0,0002–0,0120	0,12 0,05–0,30	1,2 0,9–2,7	1,6	–	32
Ce	0,0008 0,0002–0,0027	<0,0001	0,8 0,3–4,6	0,0095 0,0005–0,034	0,25 0,08–0,70	3,5 2,5–6,6	4,6	–	63
Pr	<0,0001	<0,0001	0,07 0,04–0,40	0,0007 0,0002–0,0030	0,03 0,01–0,06	0,37 0,30–0,70	0,47	–	8,7
Nd	0,0005 0,0002–0,0012	<0,0001	0,4 0,2–2,3	0,003 0,001–0,015	0,12 0,05–0,30	2,0 1,5–3,5	2,5	–	29
Sm	0,0003 0,0001–0,0004	<0,0001	0,09 0,04–0,50	0,0007 0,0002–0,0030	0,03 0,01–0,07	0,44 0,34–0,77	0,56	–	5,7
Eu	<0,0001	<0,0001	0,02 0,01–0,10	0,0005 0,0002–0,0016	0,008 0,004–0,022	0,18 0,13–0,22	0,20	–	1,3
Gd	0,0002 0,0002–0,0003	<0,0001	0,10 0,05–0,50	0,0008 0,0003–0,0032	0,040 0,020–0,120	0,47 0,36–0,76	0,60	–	6,2
Dy	0,0002 0,0002–0,0003	<0,0001	0,07 0,04–0,40	0,0006 0,0003–0,0020	0,05 0,03–0,17	0,38 0,32–0,60	0,50	–	4,8
Ho	<0,001	<0,0001	0,01 0,01–0,05	0,0003 0,0002–0,0004	0,009 0,006–0,035	0,08 0,06–0,10	0,10	–	1,6
Pb	0,003 0,001–0,010	<0,001	0,30 0,03–0,90	0,005 0,004–0,006	0,5 0,2–2,4	3,5 2,4–6,5	4,3	32	17
Bi	<0,001	<0,001	0,002 0,0003–0,0100	<0,001	0,014 0,004–0,030	0,04 0,02–0,07	0,05	–	0,33
Th	<0,0001	0,00030 0,0002–0,0030	0,0060 0,0004–0,1100	0,0030 0,0002–0,0040	0,5 0,3–1,5	0,20 0,12–0,34	0,70	–	9,3
U	0,007 0,001–0,100	0,004 0,001–0,070	0,20 0,03–2,40	0,030 0,001–0,260	0,12 0,03–1,70	0,28 0,21–0,53	0,65	–	2,5

Примечание. Приведены медиана (Me), минимальное (min) и максимальное (max) значения для обследованного участка; «–» – литературные данные отсутствуют.

Анализ представленных данных показал, что валовое содержание большинства исследуемых элементов, за исключением Ga, ниже их кларковых значений в верхней части континентальной коры. При этом содержание Ga характеризуется двухкратным превышением кларка для данного элемента, тогда как концентрации Ge и Ba в донных отложениях находятся на уровне их кларковых значений.

Распределение валового содержания элементов вдоль русла по 20 точкам отбора представлено на рисунках 2 и 3.

Профили построены по валовому содержанию элементов в зависимости от расстояния по руслу; началом отсчёта принято место выхода реки из Атомного озера. Квадратами показаны отдельные пробы, линиями – общая пространственная тенденция.

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ШАГАН (ОТ АТОМНОГО ОЗЕРА ДО РЕКИ ИРТЫШ)

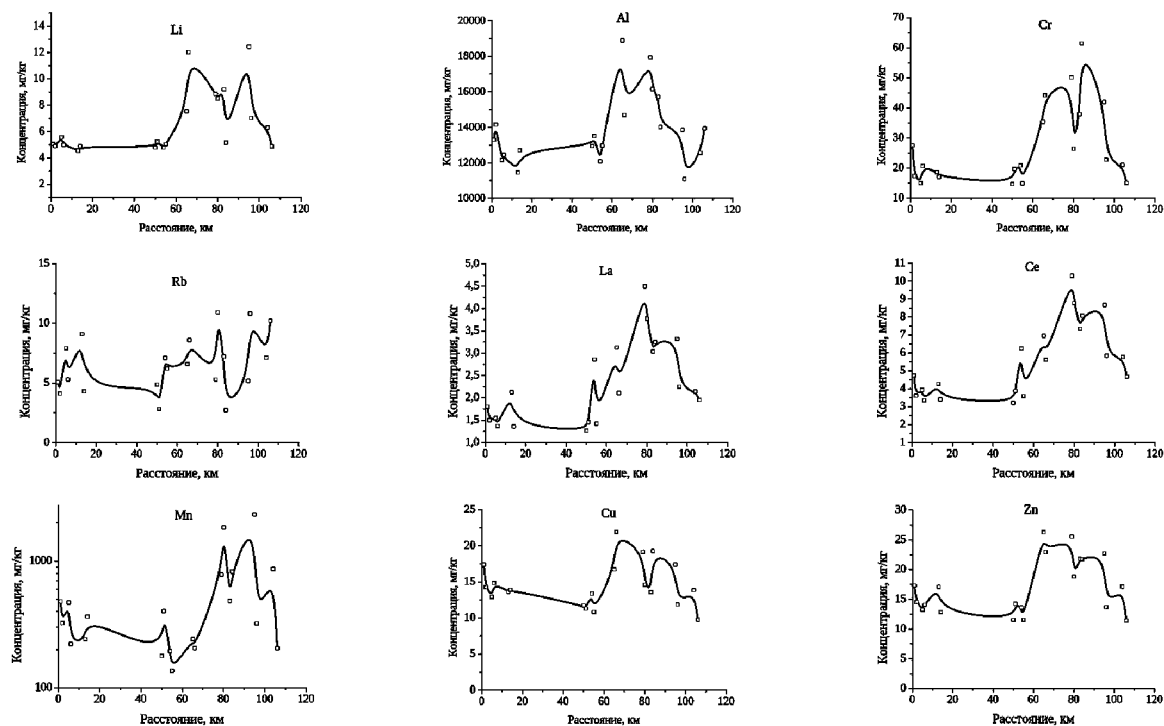


Рисунок 2. Пространственное распределение валового содержания Li, Al, Cr, Rb, La, Ce, Mn, Cu и Zn в донных отложениях реки Шаган

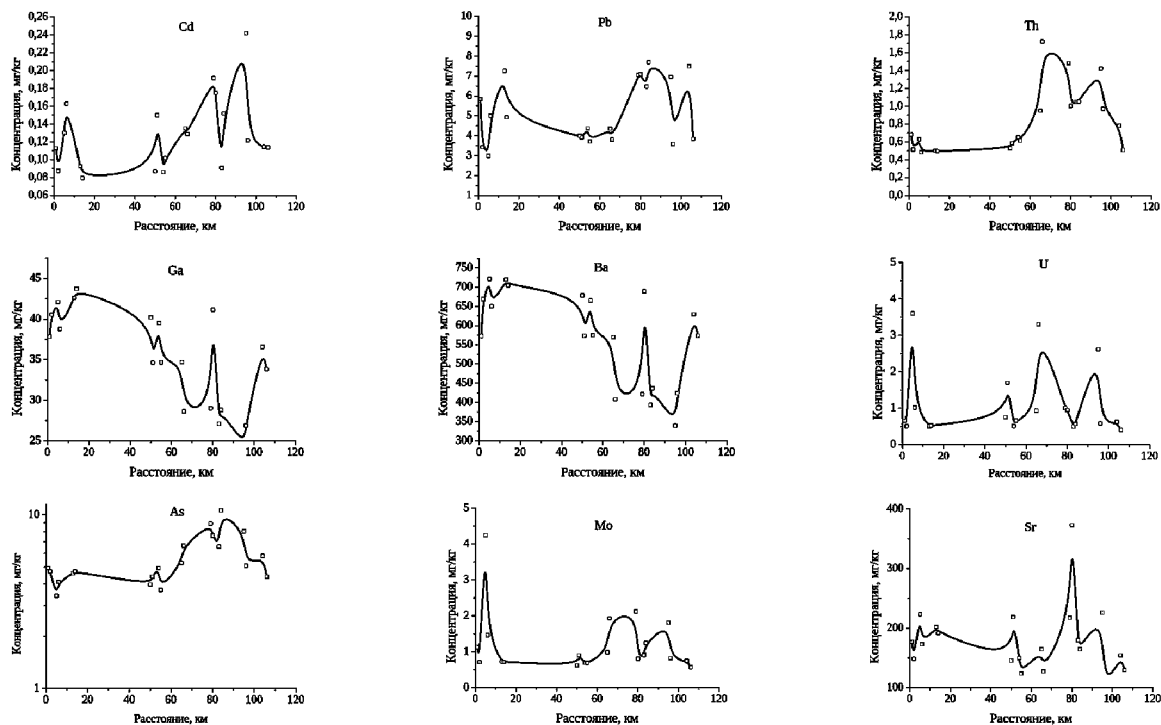


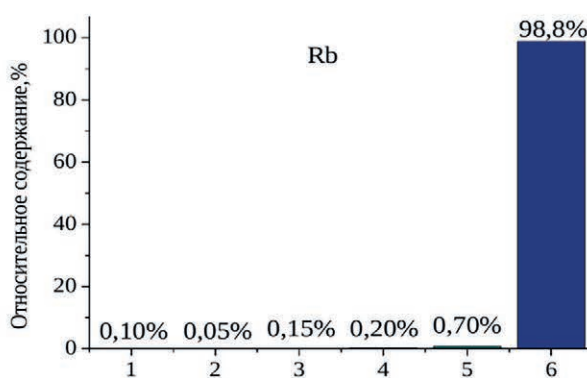
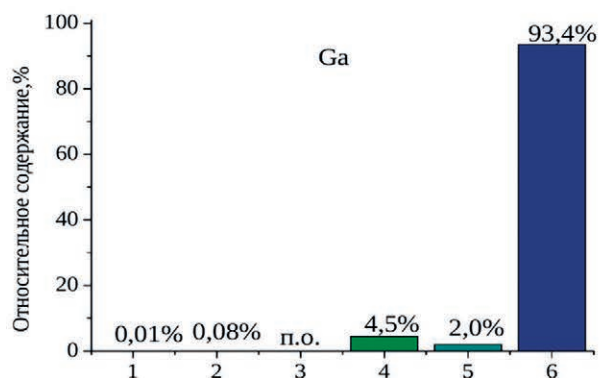
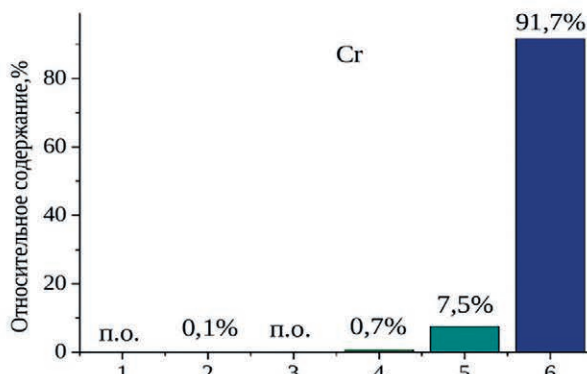
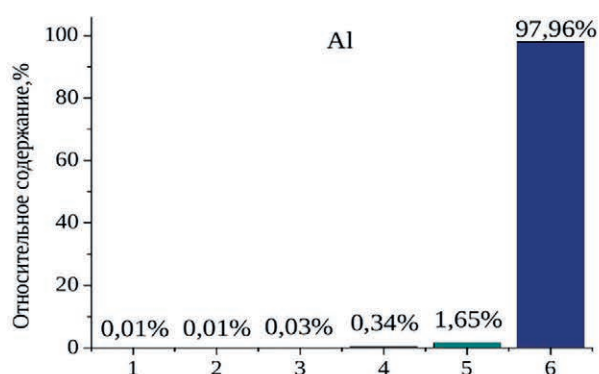
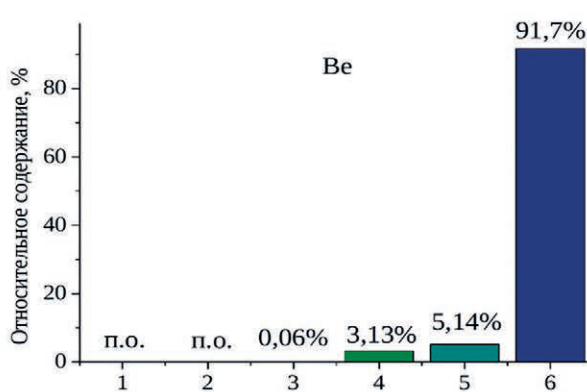
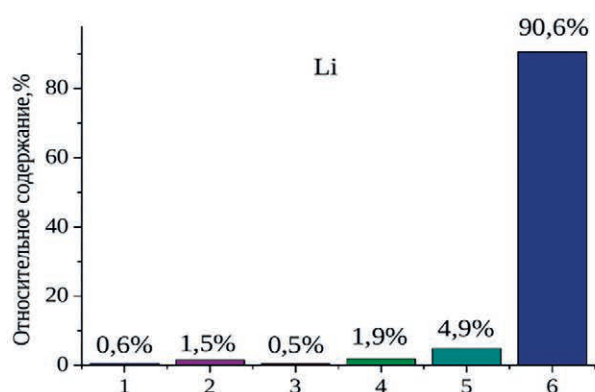
Рисунок 3. Пространственное распределение валового содержания Cd, Pb, Th, Ga, Ba, U, As, Mo и Sr в донных отложениях реки Шаган

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ШАГАН (ОТ АТОМНОГО ОЗЕРА ДО РЕКИ ИРТЫШ)

Профили показывают отсутствие единого интервала максимального накопления для всех элементов. Повышенные содержания Li, Al, Cr, La, Ce, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb, Th и As преимущественно отмечены на расстоянии 66–96 км от выхода реки из Атомного озера. Это может быть связано с сочетанием извилистости русла, локальных расширений и участков пониженной скорости течения, способствующих осаждению мелкодисперсного материала. Для Ga и Ba характерны более высокие значения в начальной части профиля, для Mo и U – отдельные максимумы в верхнем и нижнем течении; поэтому их распределение нельзя описывать

только общим интервалом 66–96 км. Такая интерпретация является предположительной и требует проверки, поскольку скорость течения, гранулометрический состав и физико-химические свойства осадков в каждой точке не определялись.

Исследование распределения элементов по формам нахождения показало, что в донных отложениях изученных участков реки Шаган выделяется группа элементов, преимущественно связанная с труднорастворимыми фракциями, что указывает на их относительно низкую миграционную способность (рисунок 4).



**ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ШАГАН
(ОТ АТОМНОГО ОЗЕРА ДО РЕКИ ИРТЫШ)**

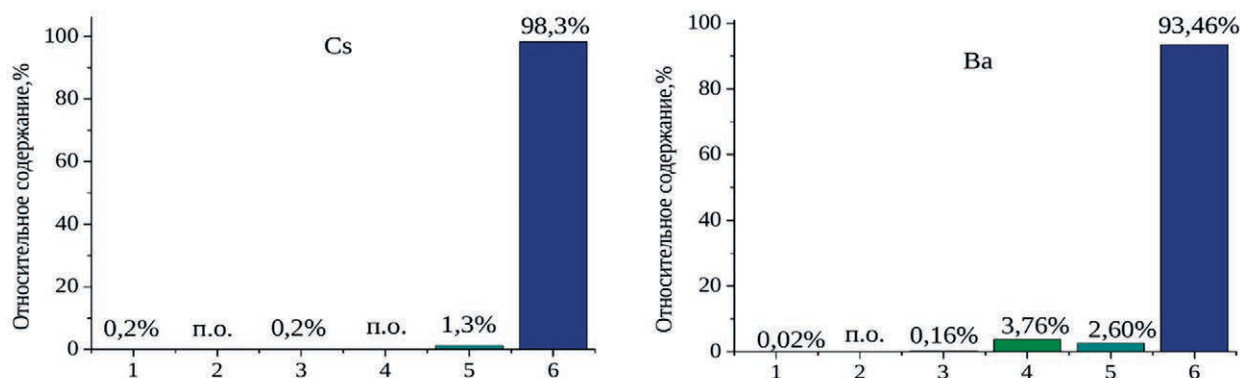
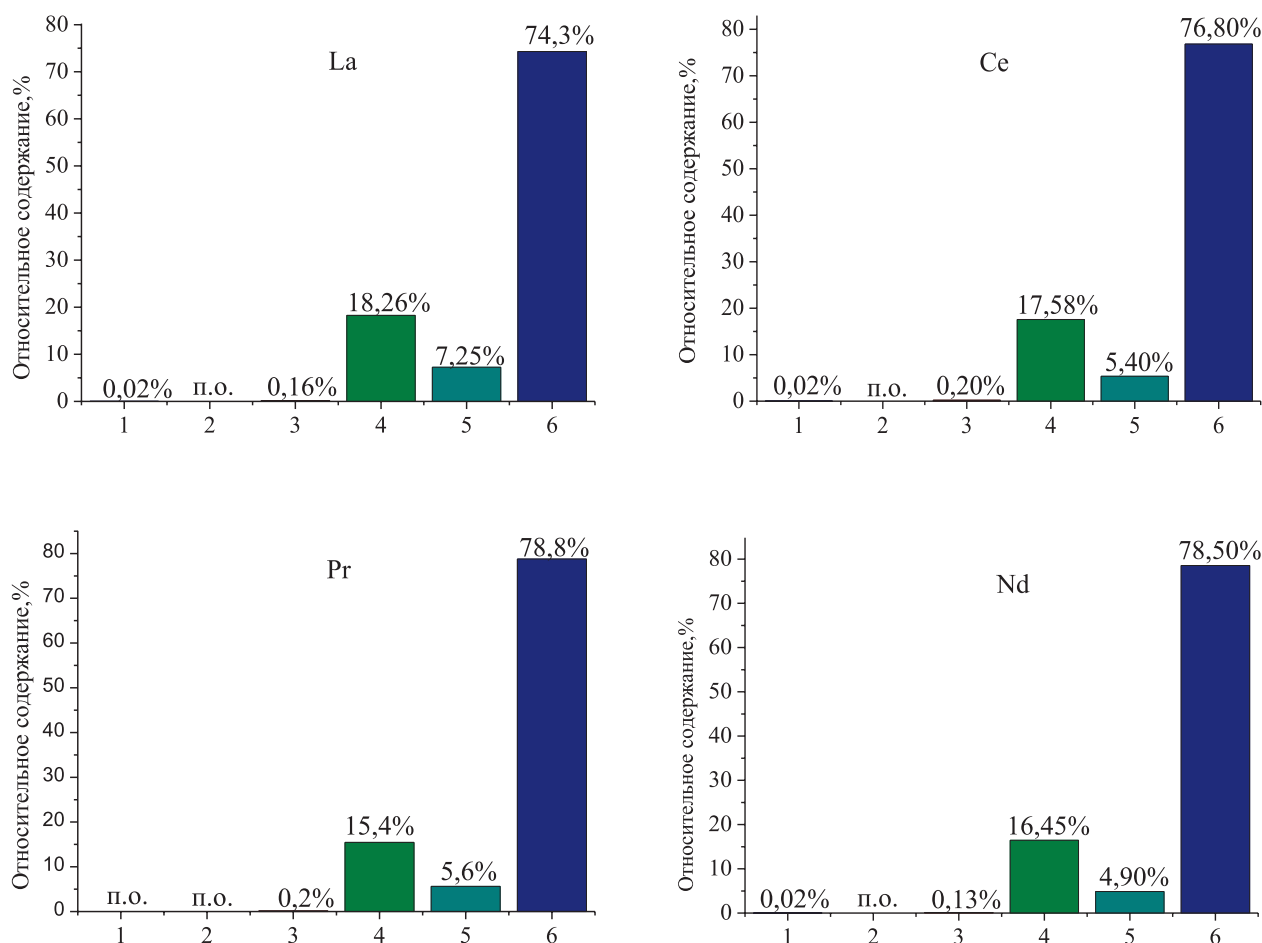


Рисунок 4. Формы нахождения Li, Be, Al, Cr, Ga, Rb, Cs и Ba в донных осадках реки Шаган (в % от валового содержания)

Примечание: здесь и далее (рис. 4–13) 1 – водорастворимая, 2 – обменная, 3 – связанная с органическим веществом, 4 – слабоспецифически сорбированная, 5 – связанная с оксидами и гидроксидами железа и марганца, 6 – остаточная.

Для Li, Be, Al, Cr, Ga, Rb, Cs и Ba более 90% валового содержания сосредоточено в труднорастворимой фракции. У РЗЭ и Cd доля слабоспецифически сорбированной и оксидно-гидроксидной фракций суммарно составляет 20...30%, однако преобладает остаточная форма (рисунок 5), что указывает на их преимущественную связь с устойчивыми минеральными фазами.

Распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) и Cd по формам нахождения представлено на рисунке 5.



**ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ШАГАН
(ОТ АТОМНОГО ОЗЕРА ДО РЕКИ ИРТЫШ)**

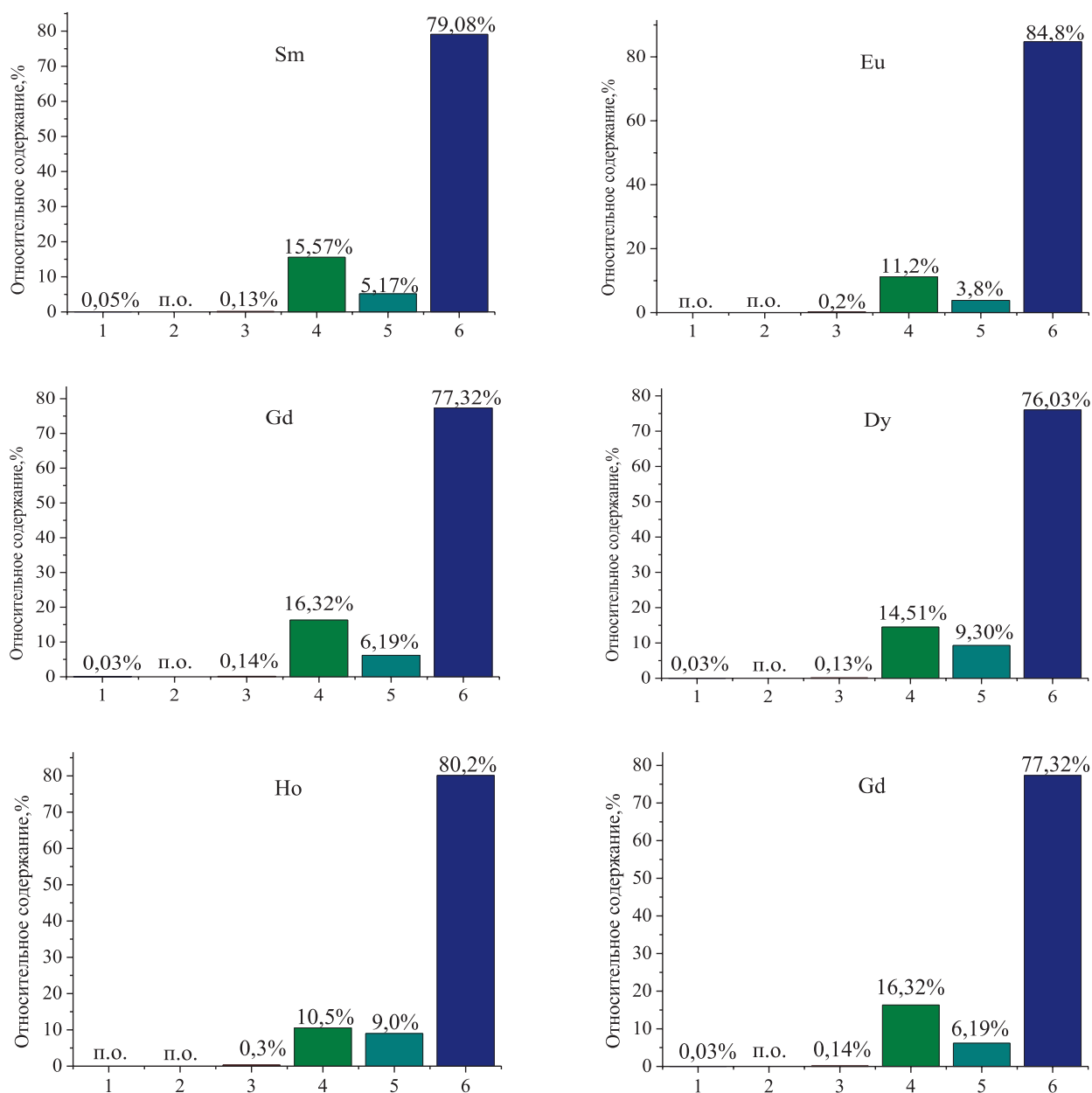


Рисунок 5. Распределение РЗЭ и Cd по формам присутствия в донных осадках реки Шаган (% от валового содержания)

Марганец распределён главным образом между слабоспецифически сорбированной формой (около 30%), оксидами и гидроксидами Fe и Mn (около 40%) и остаточной фракцией (около 28%). Для урана соответствующие доли составляют 32, 20 и 43%, ещё около 5% связано с органическим веществом (рисунок 6). Следовательно, заметная часть Mn и U потенциально подвижна при изменении окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий.

**ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ШАГАН
(ОТ АТОМНОГО ОЗЕРА ДО РЕКИ ИРТЫШ)**

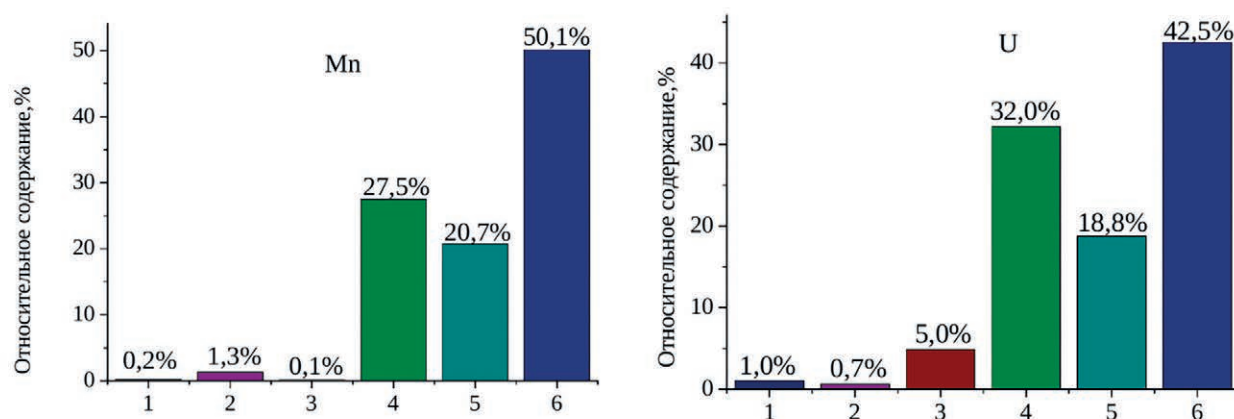


Рисунок 6. Распределение Mn и U по формам присутствия в донных осадках реки Шаган (% от валового содержания)

Ванадий и железо преимущественно сосредоточены в остаточной фракции: более 10% связано с оксидами и гидроксидами Fe и Mn, а доля слабоспецифически сорбированной формы не превышает 0,30 и 0,52% соответственно (рисунок 7).

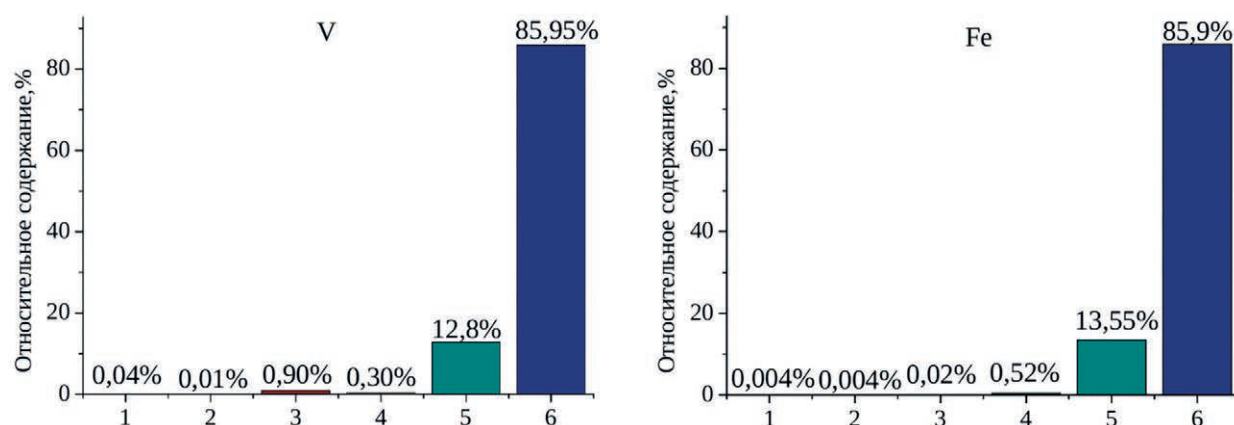
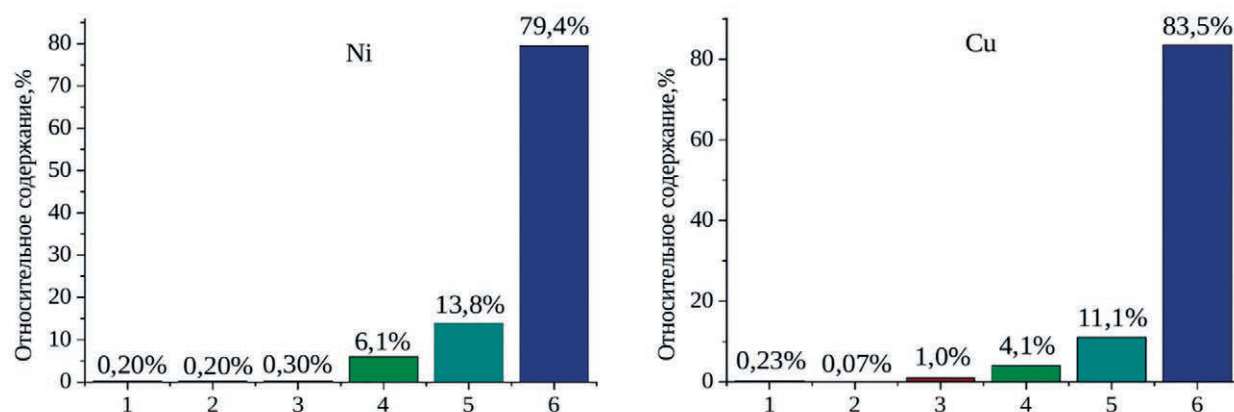


Рисунок 7. Формы нахождения V и Fe в донных осадках реки Шаган (в % от валового содержания)

На рисунке 8 приведено распределение тяжёлых металлов (Ni, Cu, Zn, Pb) по фракциям (% от валового содержания).



**ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ШАГАН
(ОТ АТОМНОГО ОЗЕРА ДО РЕКИ ИРТЫШ)**

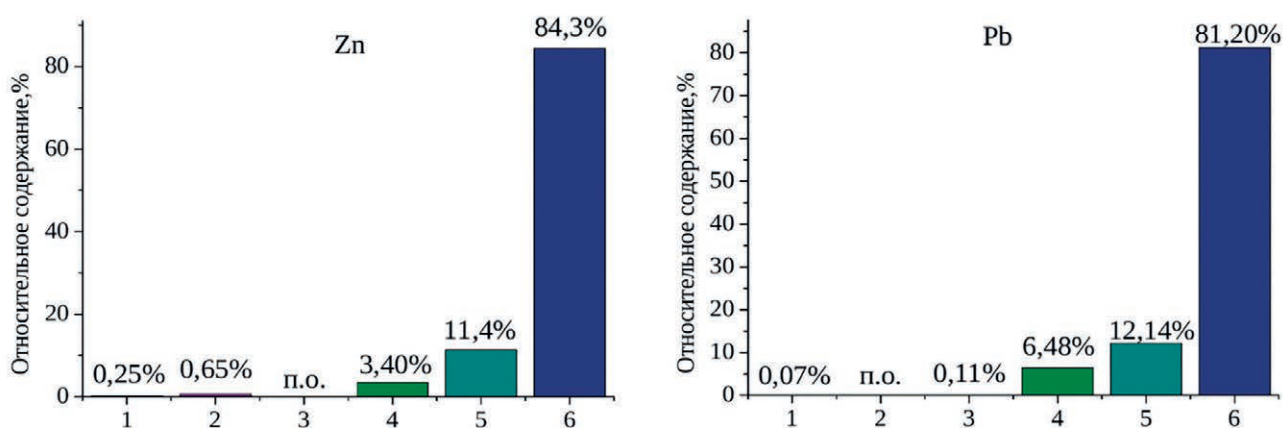


Рисунок 8. Формы соединений Ni, Cu, Zn и Pb в донных осадках реки Шаган (в % от валового содержания)

Для Ni, Cu, Zn и Pb доля водорастворимой и обменной фракций составляет менее 1%, слабоспецифически сорбированной – 3...6,5%, связанной с оксидами и гидроксидами Fe и Mn – 11...14% (рисунок 8). Не менее 80% этих металлов приходится на прочно связанные формы. Органически связанный Zn не обнаружен. Распределение может зависеть от минерального и гранулометрического состава, органического вещества, железомарганцевых оксидов и pH. Отсутствие измерений этих параметров ограничивает причинную интерпретацию.

Стронций и магний преимущественно связаны с остаточной фракцией. Для Sr её доля превышает 70%. Около 20% приходится на слабоспецифически сорбированную форму и 0,3% – на оксиды и гидроксиды Fe и Mn (рисунок 9). Для Mg раствором Тамма извлекается 8,4%, а с органическим веществом связано около 2% (рисунок 10).

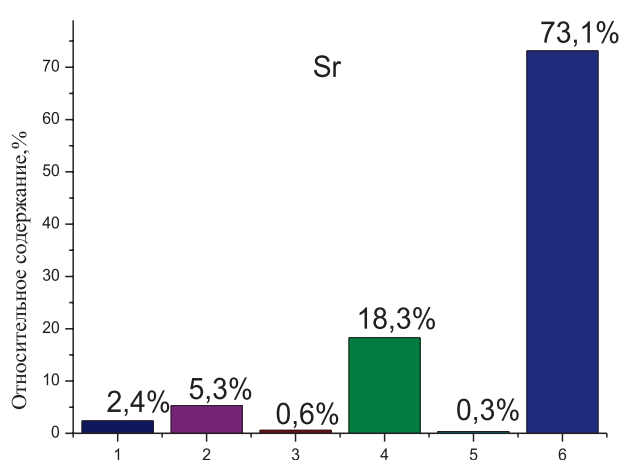


Рисунок 9. Формы соединений Sr в донных отложениях реки Шаган (в % от валового содержания)

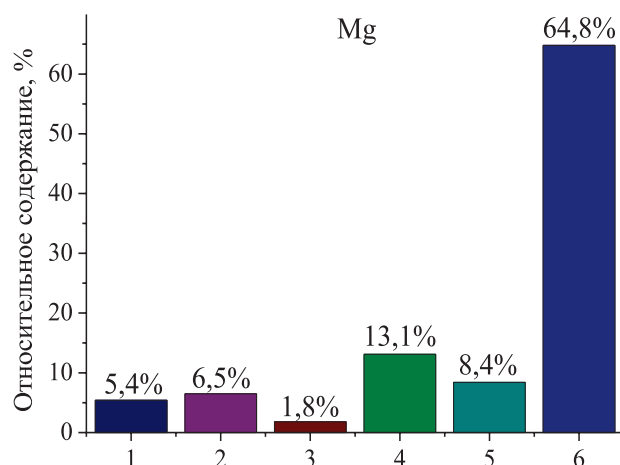


Рисунок 10. Формы соединений Mg в донных отложениях реки Шаган (в % от валового содержания)

У As и Mo около 60% валового содержания приходится на остаточную фракцию, 25...30% – на оксиды и гидроксиды Fe и Mn. Органически связанная доля составляет до 5% для As и более 8% для Mo. Молибден более подвижен: в водорастворимой и обменной формах извлекается около 5,3 и 2% соответственно (рисунок 11). У Co и Bi более 60% связано с остаточной фракцией и около 30% – с оксидами и гидроксидами Fe и Mn (рисунок 12). Торий преимущественно приурочен к окисдно-гидроксидной фракции (около 70%), а его остаточная доля составляет около 30% (рисунок 13).

**ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ШАГАН
(ОТ АТОМНОГО ОЗЕРА ДО РЕКИ ИРТЫШ)**

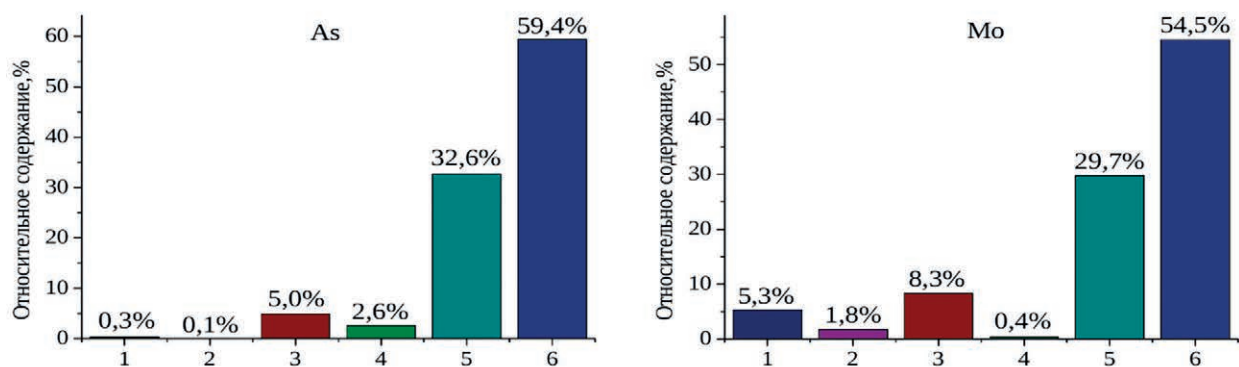


Рисунок 11. Формы соединений As и Mo в донных осадках реки Шаган (в % от валового содержания)

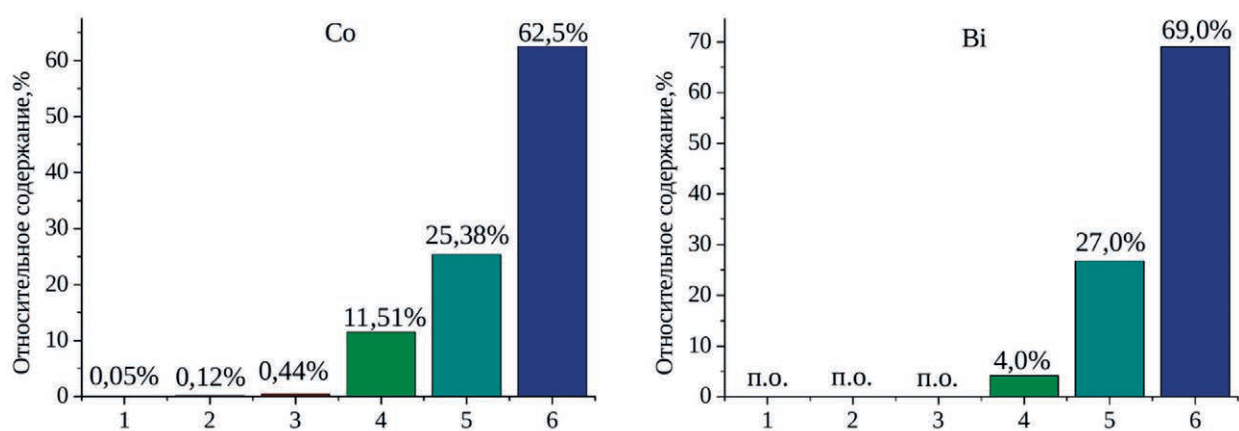


Рисунок 12. Формы соединений Co и Bi в донных осадках реки Шаган (% от валового содержания)

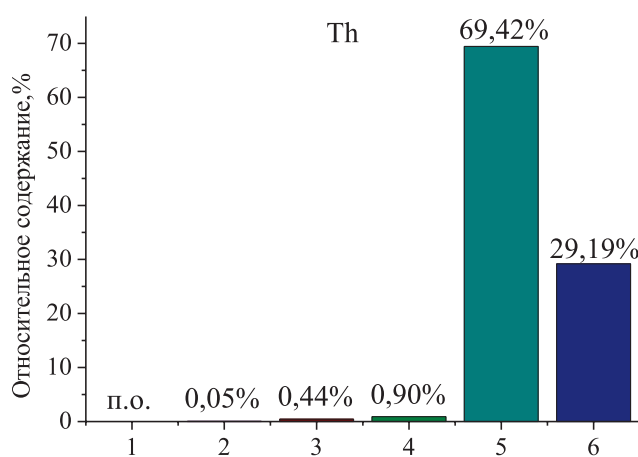


Рисунок 13. Формы нахождения Th в донных отложениях реки Шаган (% от валового содержания)

В донных отложениях нижнего течения реки Шаган большинство исследованных элементов связано главным образом с остаточной фракцией, а также с оксидами и гидроксидами железа и марганца. Визуализация валового содержания по точкам отбора показала неоднородное и элемент-специфичное пространственное распределение. Локальные максимумы Li, Al, Cr, La, Ce и Mn преимущественно приурочены к интервалу 66–96 км от выхода реки из Атомного озера. Для Ga и Ba более высокие значения характерны для начальной части обследованного участка, а распределение U и Mo включает несколько разобщённых максимумов. Следовательно, выделение единой зоны максимального накопления для всей совокупности элементов некорректно. Распределение водорастворимой и обменной форм большинства элементов по обследованному участку сходно, тогда как остаточная фракция и форма, связанная с оксидами и гидроксидами Fe и Mn, часто изменяются разнонаправленно. Работа ограничена участком от Атомного озера до Иртыша. Отсутствие контрольных проб выше территории СИП, данных по участку русла в пределах площадки «Балапан», скорости течения, гранулометрическому составу, pH, Eh и содержанию органического вещества не позволяет использовать результаты для количественной оценки трансформации всей геосистемы реки.

Данные исследования финансировались Агентством Республики Казахстан по атомной энергии в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН – BR24792713), а также грантового финансирования AP19576259 «Экологическая оценка малых рек как показатель трансформации геосистем горнодобывающих районов Восточного Казахстана»

ЛИТЕРАТУРА:

- Березин С.А. и др. Мирные ядерные взрывы на территории Казахстана // Вестник НЯЦ РК. – 2001. – №7(3). – С. 57–62.
- Дюсембаева М.Т. Эколого-геохимические особенности некоторых водных объектов Семипалатинского испытательного полигона / М.Т. Дюсембаева, Н.Ж. Мухамедияров, Г.М. Есылканов, А.Ж. Ташекова, А.О. Айдарханов. – Курчатов: ИД «Интеллект», 2023. – 268 с.
- Батырбеков Э.Г., Айдарханов А.О., Витюк В.А. и др. Комплексное радиоэкологическое обследование Семипалатинского испытательного полигона: монография. – Курчатов, 2021. – 340 с.
- Tessier A., Rapin F., Garignan R. Trace metals in oxic lake sediments: possible adsorption onto iron oxyhydroxides // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 1985. – Vol. 49, No. 1.
- Ладонин Д.В. Соединения тяжелых металлов в почвах – проблемы и методы изучения // Почвоведение. – 2002. – № 6. – С. 682–692.
- Ю.С. Восель, В.Д. Страховенко, И.В. Макарова «Формы нахождения урана в озерных донных отложениях разного типа. Байкальский регион» // Материалы IV Международной конференции, г. Томск, 4–8 июня 2013 г. – С. 130–134.
- Ладонин Д.В. Формы соединений тяжелых металлов в техногенно-загрязненных почвах. Диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук. Москва – 2016.
- Н.А. Григорьев – Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // Геохимия. – 2003. – № 7. – С. 785–792.
- Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: гигиенические нормативы (ГН 2.1.7.2041-06). – М.: Информ.-издат. Центр Госкомсанэпиднадзора России, 2006.
- Мур Дж., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах: контроль и оценка влияния: пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 288 с.
- Bauer M., Blodau C. Arsenic distribution in the dissolved, colloidal and particulate size fraction of experimental solution rich in dissolved organic matter and ferric iron // Geochim. Cosmochim. Acta. – 2009. – Vol. 73. – No. 3. – P. 529–542.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 439 с.

REFERENCES

- Berezin S.A., et al. Peaceful nuclear explosions on the territory of Kazakhstan. Bulletin of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan. 2001; 7(3): 57–62.
- Dyussebayeva M.T., Mukhamediyarov N.Zh., Yesilkanov G.M., Tasheкова A.Zh., Aidarkhanov A.O. Ecological and geochemical features of some water bodies of the Semipalatinsk Test Site. Kurchatov: Intellectual Publishing House; 2023. 268 p.
- Batyrbekov E.G., Aidarkhanov A.O., Vityuk V.A., et al. Comprehensive radioecological survey of the Semipalatinsk Test Site: monograph. Kurchatov; 2021. 340 p.
- Tessier A., Rapin F., Garignan R. Trace metals in oxic lake sediments: possible adsorption onto iron oxyhydroxides. Geochimica et Cosmochimica Acta. 1985; 49(1).
- Ladonin D.V. Heavy metal compounds in soils: problems and methods of study. Eurasian Soil Science. 2002; (6): 682–692.
- Vosel Yu.S., Strakhovenko V.D., Makarova I.V. Forms of uranium occurrence in lake bottom sediments of different types: Baikal region. In: Proceedings of the IV International Conference. Tomsk; 4–8 June 2013. p. 130–134.
- Ladonin D.V. Forms of heavy metal compounds in technogenically contaminated soils. Doctoral Dissertation in Biological Sciences. Moscow; 2016.
- Grigoriev N.A. Average content of chemical elements in rocks composing the upper continental crust. Geochemistry International. 2003; (7): 785–792.
- Maximum permissible concentrations (MPC) of chemical substances in soils: hygienic standards GN 2.1.7.2041-06. Moscow: Informational Publishing Center of the State Committee for Sanitary and Epidemiological Supervision of Russia; 2006.

**ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ШАГАН
(ОТ АТОМНОГО ОЗЕРА ДО РЕКИ ИРТЫШ)**

10. Moore J., Ramamoorthy S. Heavy metals in natural waters: applied monitoring and impact assessment. Moscow: Mir Publishers; 1987. 288 p. solutions rich in dissolved organic matter and ferric iron. Geochimica et Cosmochimica Acta. 2009; 73(3): 529–542.
11. Bauer M., Blodau C. Arsenic distribution in the dissolved, colloidal and particulate size fractions of experimental 12. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. Moscow: Mir Publishers; 1989. 439 p.

**ШАҒАН ӨЗЕНІНІҢ ТӨМЕНГІ АҒЫСЫНДАҒЫ ТҮПТІК ШӨГІНДІЛЕРДЕГІ
МИКРОЭЛЕМЕНТТЕРДІҢ КЕЗДЕСУ ФОРМАЛАРЫ (АТОМ КӨЛІНЕН ЕРТІС ӨЗЕНІНЕ ДЕЙІН)**

М.Т. Дюсембаева, А.Ж. Ташекова*, Н.В. Ларионова, С.Е. Салменбаев, С.Д. Смирнов, Н.К. Нургайсинова

ҚР ҰАО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

* Байланыс үшін e-mail: zhymanova.13@mail.ru

Бұл мақалада Шаған өзені арнасы түбіндегі шөгінділердегі микроэлементтердің жалпы мөлшері мен пайда болу формаларын зерттеу нәтижелері ұсынылған. Атом көлінен өзеннің шығатын жерінен бастап Ертіс өзеніне құятын жеріне дейінгі су торабындағы он тұстамадан алынған 20 сынамаға талдау жүргізілді. Өзендегі бөліктер анықталды. Зерттелген элементтердің ең көп мөлшері Шаған өзенінің өзен бастауынан 66–96 км аралығындағы учаскесінде жинақталған. Микроэлементтердің алты түрі анықталды: суда еритін, алмасатын, әлсіз сорбцияланған, органикалық заттармен байланысқан, темір және марганец оксидтері/гидроксидтерімен байланысқан (шөгінді түрі) және қалдық. Зерттелген элементтердің көпшілігінің жалпы концентрациясы, Ga қоспағанда, жоғарғы континенттік қыртыста кларк мәндерінен төмен екені анықталды. Орташа есеппен, зерттелген элементтердің барлығы H₂O, Ca(NO₃)₂ және NaOH сияқты «әлсіз» экстракттардың ерітінділерінде айтарлықтай аз екені анықталды. Зерттелген элементтердің барлығы үшін бұл ортадағы шаймалау жылдамдығы 20%-дан аз болды. Зерттелген химиялық элементтердің айтарлықтай мөлшері нашар еритін түрінде шоғырланғаны анықталды (шаймалау жылдамдығы >70%).

Түйін сөздер: түбіндегі шөгінділер, жылжымалы формалар, микроэлементтер, Балапан учаскесі, Шаған өзені

**FORMS OF TRACE ELEMENTS IN BOTTOM SEDIMENTS OF THE LOWER SHAGAN RIVER
(FROM ATOMIC LAKE TO THE IRTYSH RIVER)**

M. Dyusembayeva, A. Tasheкова*, N. Larionova, S. Salmenbaev, S. Smirnov, N. Nurgaisinova

Branch office 'Institute of Radiation Safety and Ecology' of the RSE NNC RK, Kurchatov t., Kazakhstan

* E-mail for contacts: zhymanova.13@mail.ru

This article presents the gross contents and chemical fractionation of trace elements in bottom sediments of the lower Shagan River. Twenty samples were collected at ten cross-sections between the outlet of Atomic Lake and the confluence with the Irtysh River. The point-by-point profiles show element-specific spatial patterns rather than one common accumulation zone. Local maxima of Li, Al, Cr, La, Ce, and Mn occur mainly 66–96 km downstream from Atomic Lake; Ga and Ba are higher in the upper part of the surveyed reach, while U and Mo show multiple separated peaks. Six fractions were identified: water-soluble, exchangeable, weakly specifically sorbed, organic-bound, Fe–Mn oxide/hydroxide-bound, and residual. Most elements, except Ga, had gross contents below upper continental crust values. Less than 20% was extracted using H₂O, Ca (NO₃)₂, and NaOH combined, whereas more than 70% of many elements occurred in poorly soluble forms.

Keywords: bottom sediments, element fractionation, trace elements, Atomic Lake, lower reach, Shagan River.