

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-28-39>

УДК: 550.424:556.531:504.064

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ РУЧЬЯ КАРАБУЛАК СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

М. Т. Дюсембаева, А.Ж. Ташекова^{*}, 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 настоящей работе приведены результаты изучения особенностей распределения микроэлементов и их форм присутствия в донных осадках ручья Карабулак, расположенного на территории горного массива Дегелен Семипалатинского испытательного полигона. Отбор образцов донных осадков осуществлялся в 19 пунктах, охватывающих основное русло водотока и четыре его притока. Для установления форм присутствия химических элементов использован метод последовательного экстрагирования, обеспечивающий разделение элементов на водорастворимую, обменную, слабоспецифически сорбированную, связанную с органическим веществом, ассоциированную с оксидами и гидроксидами железа и марганца, а также остаточную фракцию. Количественное определение элементов выполнено методами ICP-MS и ICP-AES. Установлено, что содержание микроэлементов в донных отложениях характеризуется значительной пространственной неоднородностью, обусловленной гидрологическими особенностями ручья и техногенным воздействием территории бывшего полигона. Выявлены превышения кларковых значений для ряда элементов, прежде всего для урана, бериллия, молибдена и кадмия. Наиболее высокие концентрации Be, Sr и Cd отмечены в верхнем течении ручья, тогда как содержание Mo и U возрастает в нижнем течении. Показано, что уран в донных отложениях основного русла преимущественно находится в водорастворимой форме, что свидетельствует о его высокой миграционной способности и потенциальной экологической опасности.

Ключевые слова: донные отложения, микроэлементы, последовательное экстрагирование, пространственное распределение, тяжёлые металлы, уран, редкоземельные элементы, Семипалатинский испытательный полигон.

ВВЕДЕНИЕ

Среди водных объектов, формирующих гидрографическую сеть горного массива Дегелен Семипалатинского испытательного полигона (СИП), выделяется ручей Карабулак. Ручей Карабулак имеет четыре притока и характеризуется непостоянным водотоком с частым пересыханием отдельных участков в летний период [1].

Радиоэкологическое состояние бассейна ручья Карабулак обусловлено его расположением в непосредственной близости к горному массиву Дегелен – одной из ключевых испытательных площадок СИП, где проводились подземные ядерные взрывы в горизонтальных горных выработках (штольнях). Большинство штолен пройдено в относительно сухих породах. Водоприток в подземные выработки происходит преимущественно по системам экзогенных трещин и зонам тектонических нарушений (разломов), что способствует переносу техногенных радионуклидов водными потоками [1–4]. Результаты радиационного мониторинга территории горного массива Дегелен свидетельствуют, что вынос радионуклидов из штолен с водопроявлениями и их накопление в руслах постоянных и временных водотоков продолжаются до настоящего времени [3–6]. Помимо техногенных радионуклидов, в системе «вода – донные осадки»

ручья Карабулак установлены повышенные содержания редкоземельных элементов и тяжёлых металлов [7–9]. Загрязнение водотоков площадки «Дегелен» тяжёлыми металлами обусловлено сочетанием природной геохимической специфики района и техногенного воздействия подземных ядерных взрывов, активизировавших миграционные процессы и вовлечение микроэлементов в водную среду наряду с радионуклидами.

В условиях интенсивного хозяйственного освоения территории бывшего полигона особую актуальность приобретают исследования радиационной ситуации и общего химического загрязнения природных экосистем, прежде всего донных осадков тяжёлыми металлами и токсичными элементами.

Донные отложения рек являются важным компонентом водных экосистем и играют ключевую роль в формировании их экологического состояния. Они представляют собой депо различных химических элементов и соединений, включая биогенные вещества и загрязняющие компоненты антропогенного происхождения. Благодаря способности аккумулировать загрязняющие вещества донные отложения рассматриваются как интегральный индикатор длительного воздействия природных и техногенных факторов на водные объекты.

Исследование гранулометрического, минералогического и геохимического состава донных отложений позволяет выявить источники и масштабы загрязнения речных экосистем тяжёлыми металлами, нефтепродуктами и устойчивыми органическими соединениями. В условиях изменения гидрологического режима, заиливания или дефицита кислорода возможно вторичное поступление загрязняющих веществ из донных отложений в водную толщу, что представляет дополнительную экологическую угрозу [4, 8].

Результаты комплексного изучения донных осадков могут быть использованы в дальнейшем для формирования методических подходов к экологической оценке и прогнозированию содержания тяжёлых металлов и токсичных элементов в природных экосистемах, расположенных в пределах Семипалатинского испытательного полигона и на прилегающих территориях.

В рамках настоящей работы рассмотрены показатели валового содержания микроэлементов и их распределения по формам в донных осадках ручья Карабулак и его приточных водотоков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

Пробы донных осадков были собраны в 19 точках, охватывающих основное русло ручья Карабулак и четыре его притока, отличающиеся по уровню накопления химических элементов. Выбор точек отбора осуществлялся с учетом следующих факторов: расположения участков относительно истоков, среднего течения и устьевых зон ручья и его притоков; особенностей гидрологического режима, включая сезонные изменения водности, образование застойных участков и периодическое пересыхание русла, а также расположения относительно штолен, зон разгрузки подземных вод и потенциальных путей миграции радионуклидов и токсичных элементов.

В летний период происходит застаивание, образование плёсов и пересыхание вод основного русла и притоков, т.к. основным источником водного питания ручья являются атмосферные осадки. Наиболее водообильными участками являются верховья притоков. Начиная от истоков основное русло и притоки хорошо сформированы, есть течение. На средних участках, вплоть до устья, вода стоячая, течения уже практически нет.

На рисунке 1 представлена карта-схема отбора проб донных отложений.

Отбор проб

Отбор образцов донных осадков осуществлялся методом точечного отбора (укола) из поверхностного слоя толщиной 0–5 см на площади 100 см² в соответствии с требованиями ГОСТ 17.1.5.01–80 «Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анали-

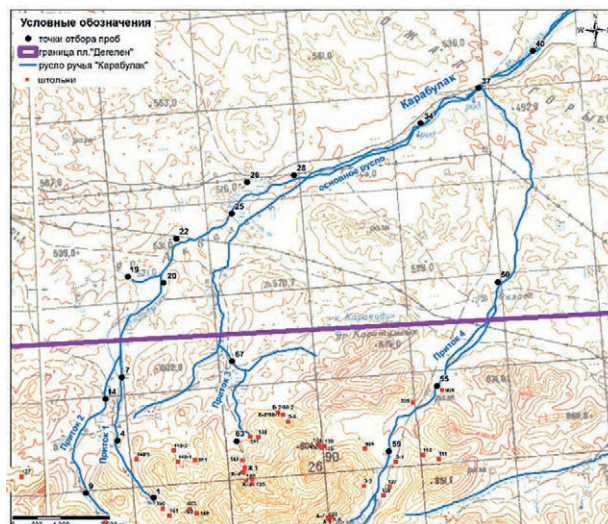


Рисунок 1. Карта-схема пунктов пробоотбора донных осадков в пределах русла ручья Карабулак и его приточных водотоков

за на загрязненность». Полученные образцы донных осадков высушивали естественным способом при комнатной температуре до достижения воздушно-сухого состояния. После высушивания пробы просеивали через полиамидное сито с размером ячеек 1 мм. Из предварительно измельченного и гомогенизированного материала методом многократного квартования выделяли представительную навеску массой 5 г, предназначенную для последующего получения вытяжек методом последовательного экстрагирования.

Подготовка проб

В ходе исследования определялись подвижные формы химических элементов, включая водорастворимую, обменную, слабоспецифически сорбированную, связанную с органическим веществом, ассоциированную с оксидами и гидроксидами железа и марганца, а также остаточную фракцию [10–13].

Метод последовательного экстрагирования основан на поэтапном выделении различных форм элементов из одной навески образца посредством последовательного воздействия экстрагентов возрастающей химической активности. Обработка проб осуществлялась серией селективных растворителей, предложенных рядом исследователей [10–11] обеспечивающих выделение следующих фракций: водорастворимой (экстрагент – дистиллированная вода – ХЭводн.); обменной (0,1 М раствор $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ – ХЭобмен); слабоспецифически сорбированной (3 % раствор CH_3COOH – ХЭсп.сорб.); связанной с органическим веществом (0,1 М раствор NaOH – ХЭорг.); связанной с оксидами и гидроксидами железа и марганца (раствор Тамма – ХЭокс/гидрокс Fe и Mn); остаточной (разложение концентрированной HF в смеси с 7 М HNO_3 – ХЭост.).

Соотношение «донные осадки: экстрагент» составляло 1:10. Продолжительность воздействия каж-

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ РУЧЬЯ КАРАБУЛАК СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

дого экстрагента составляла 1 час, при этом навеска находилась в режиме непрерывного перемешивания на ротаторе. После завершения стадии экстрагирования жидкую фазу отделяли от твёрдого остатка методом центрифугирования в течение 10 минут при скорости вращения 4000–6000 об/мин. После каждой стадии обработки остаток дополнительно промывали дистиллированной водой.

Количественное определение содержания химических элементов в полученных фракциях выполнялось методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на квадрупольных масс-спектрометрах Agilent 7700x и Elan 9000, а также методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES) на спектрометре iCAP 6300 Duo. Анализ образцов донных осадков проводился в соответствии с требованиями международного стандарта ISO 17294-2:2019.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты масс-спектрометрического анализа проб донных отложений ручья Карабулак в различных формах соединений представлены в таблице 1.

Рассчитаны медианные значения результатов анализа для каждой точки отбора проб. Полученные значения концентрации сравнивались с кларками – усреднёнными содержаниями элементов в верхней части континентальной коры по Григорьеву [14], т.к. утверждённые экологические нормативы содержания элементов в донных отложениях отсутствуют. Большинство элементов не имеют высокого разброса значений концентрации между содержаниями в различных формах, за исключением U и Mn. В то же время внутри одной формы разброс значений измеренных концентраций может отличаться на несколько порядков. В сравнении с кларком верхней части континентальной коры наблюдается превышение валового содержания Be, Mo, Cd, U.

Таблица 1. Распределение элементов по формам соединений в донных осадках ручья Карабулак (метод последовательного экстрагирования), мг/кг

Элемент	Формы соединений						Валовое содержание	ПДК в почве [15]	Кларк в верх. части. конт. коры [14]
	Мехэводн min-max	Мехэобм min-max	Мехэспсорб min-max	Мехэорг min-max	Мехэокс гидрокс Fe и Mn min-max	Мехэ ост min-max			
Li	0,12 0,02–0,8	0,12 0,01–0,32	0,4 0,2–6,7	0,1 0,01–0,2	0,4 0,08–7,6	10 5–29	11	–	22
Be	0,02 <0,0001–0,04	0,02 <0,0001–0,05	1,5 0,1–11	0,2 <0,0001–0,8	2,3 <0,0001–18	3,3 0,9–17	7,2	–	2,1
Mg	85 19–790	303 97–1007	240 62–17000	49 4–580	140 30–1400	1700 220–6100	2517	–	13500
Al	4,6 1–490	3,9 3,9–3,9	157,5 36–495	12 <0,1–78	805 140–2000	12000 8500–20000	12983	–	77400
Sc	0,01 <0,0001–0,5	<0,0001	0,3 0,14–0,74	<0,0001	<0,0001	1,2 0,2–3,5	1,5	–	15
V	0,07 0,01–1,4	0,02 <0,001–0,09	0,44 <0,001–6,83	0,3 <0,001–0,7	7,5 1,1–35	30 11–45	38	150	120
Cr	0,01 0,004–0,7	0,01 <0,01–0,01	0,42 <0,01–3,97	0,1 0,02–0,1	4,8 <0,001–7	22,5 7–44	28	200	150
Mn	0,36 0,05–15	1,90 0,1–130	190 4–3010	5,2 <0,01–410	38 1–3800	150 70–1600	385	1500	670
Fe	3,1 0,6–450	<0,1	43,5 4–2500	25 1–310	1850 400–9700	10150 4000–19000	12071	–	30900
Co	0,01 0,001–0,24	<0,001	0,75 0,2–10,5	0,1 <0,001–0,8	0,9 0,06–7,8	3,5 1,6–9	5,1	100	17
Ni	0,06 <0,001–0,28	<0,001	2 0,2–7,4	0,2 <0,001–0,8	4,1 0,05–8,2	14 3,2–24	20	100	62
Cu	0,05 0,01–0,3	0,02 <0,0001–0,07	0,5 <0,0001–3,5	0,5 <0,0001–0,6	4,8 0,2–18	18 4,7–35	24	100	39
Zn	0,06 0,02–1,1	0,13 <0,01–4,05	6,25 0,7–370	0,4 <0,01–7,5	6,1 <0,01–100	45,5 11–370	58	300	78
Ga	0,01 0,005–0,18	<0,0001	1,7 0,1–4,4	0,2 0,003–0,5	0,5 0,15–2,1	17 6–28	19	–	19
Ge	0,004 <0,0001–0,04	<0,0001	0,06 <0,0001–0,24	<0,0001	0,2 <0,01–0,6	0,6 0,3–1,3	0,9	–	1

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ РУЧЬЯ КАРАБУЛАК
СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА**

Элемент	Формы соединений						Валовое содержание	ПДК в почве [15]	Кларк в верх. части. конт. коры [14]
	Мехэводн min-max	Мехэобм min-max	Мехэспсорб min-max	Мехэорг min-max	Мехэокс гидрокс Fe и Mn min-max	Мехэ ост min-max			
As	0,03 0,01–0,36	0,95 <0,001–9,7	0,355 0,04–1,32	0,04 <0,001–0,3	1,8 0,2–15	1,4 0,4–32	4,5	20	6,5
Rb	0,02 0,01–0,87	0,02 0,01–0,04	0,03 0,01–0,06	0,009 0,004–0,02	0,2 0,1–0,5	20,5 5–41	21	–	110
Sr	3,47 0,55–47	20 7–49	34,5 8–1140	4,7 0,4–100	0,4 0,1–0,9	33,5 2,8–91	97	–	270
Mo	2,06 0,08–70	0,27 0,02–47	0,044 <0,001–3,37	0,1 0,002–2,2	2 0,5–440	6,6 2,1–470	11	50	1,5
Ba	0,40 0,14–1,4	<0,1	50,5 4–110	7,3 0,2–21	7,3 1,3–48	180 60–390	245	–	510
Cd	0,004 0,001–0,12	0,01 <0,0001–0,1	0,195 0,05–2,23	0,008 <0,0001–0,09	0,1 <0,0001–0,7	0,6 0,1–1,9	0,8	3	0,3
Cs	0,001 <0,0001–0,06	0,002 <0,0001–0,003	<0,0001	0,003 <0,0001–0,003	0,01 <0,0001–0,1	0,7 0,02–2	0,7	–	4
La	0,002 <0,0001–0,03	0,005 <0,0001–0,006	0,7 0,1–3,4	0,005 <0,0001–0,07	0,6 <0,0001–2	6,7 1,4–29	7,9	–	32
Ce	0,003 <0,0001–0,06	<0,0001	1,1 0,1–6,9	0,008 <0,0001–0,16	1,0 <0,0001–3	15 4–41	17	–	63
Pr	0,002 <0,0001–0,01	<0,0001	0,15 0,01–0,65	0,001 <0,0001–0,016	0,2 <0,0001–0,5	2 0,5–8,9	2,3	–	8,7
Nd	0,002 <0,0001–0,03	0,003 <0,0001–0,004	0,75 0,1–3,1	0,004 <0,0001–0,09	0,7 <0,0001–2,5	7,7 2,3–41	9,2	–	29
Sm	0,003 <0,0001–0,01	<0,0001	0,17 0,01–0,66	0,002 <0,0001–0,02	0,2 <0,0001–0,6	1,7 0,4–8,2	2,1	–	5,7
Eu	0,001 <0,0001–0,001	<0,0001	0,05 0,01–0,15	0,002 <0,0001–0,007	0,1 <0,0001–0,1	0,3 0,1–0,9	0,4	–	1,3
Gd	0,003 <0,0001–0,01	<0,0001	0,19 0,01–0,76	0,003 <0,0001–0,023	0,4 <0,0001–1,1	1,8 0,5–9	2,3	–	6,2
Dy	0,002 <0,0001–0,04	<0,0001	0,16 <0,0001–0,62	0,002 <0,0001–0,017	0,7 <0,0001–1,7	1,6 0,5–8,8	2,5	–	4,8
Ho	0,010 <0,0001–0,01	<0,0001	0,03 <0,0001–0,11	0,0004 <0,0001–0,003	0,2 <0,0001–0,4	0,3 0,1–1,9	0,5	–	1,6
Pb	0,04 <0,001–0,8	<0,001	0,9 0,2–26	0,02 <0,001–0,1	0,4 <0,001–14	12 5,7–110	13	32	17
Bi	0,003 0,001–0,01	<0,001	0,0065 <0,001–0,62	<0,001	0,03 <0,001–0,2	0,2 0,1–3,9	0,2	–	0,33
Th	0,002 <0,0001–0,04	<0,0001	0,0245 <0,0001–0,2	<0,0001	1,0 <0,0001–1,4	1,1 0,4–3	2,1	–	9,3
U	3,9 0,01–63	0,012 <0,0001–2,2	1,5 0,01–100	0,02 0,0003–13	3,2 0,4–220	3,6 1,1–32	12	–	2,5

Примечание. Медиана (Me) валового содержания по всему ручью, минимальное (min) и максимальное (max) значения, меньше предела обнаружения (<п.о.); – отсутствие литературных данных.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ РУЧЬЯ КАРАБУЛАК СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

В большинстве исследованных случаев фиксируется тенденция к возрастанию абсолютных концентраций форм соединений элементов по мере перехода от наиболее подвижных к наиболее прочно закреплённым фракциям: $X_{\text{водн}} < X_{\text{обм}} < X_{\text{орг}} < X_{\text{сп. сорб}} < X_{\text{окс/гидрокс Fe и Mn}} < X_{\text{ост.}}$

Анализ донных осадков основного русла ручья и его притоков позволил выявить характерные различия в содержании отдельных элементов. В таблице 2 приведены медианные показатели концентраций элементов в донных осадках основного русла и четырёх притоков с их сравнением со средними валовыми значениями по всей исследуемой водной системе.

Таблица 2. Валовое содержание элементов в донных отложениях р. Карабулак

Элемент	Медиана (Ме), мг/кг					
	Русло	Приток 1	Приток 2	Приток 3	Приток 4	Среднее по ручью
Li	12	15	18	13	11	12
Be	2,3	15	28	19	14	9,6
Mg	4000	3200	3000	1300	2700	3200
Al	11800	13000	18300	12800	14000	13000
Sc	1,7	1,5	2,8	1,1	1,5	1,5
V	31	42	51	38	45	38
Cr	18	26	38	19	27	24
Mn	380	250	300	2900	2100	400
Fe	12100	9600	14000	15000	21000	13000
Co	5,6	4,0	6,6	7,9	12	6,1
Ni	14	23	27	23	30	18
Cu	14	40	28	22	24	22
Zn	32	41	79	320	79	59
Ga	19	19	21	22	21	19
Ge	0,76	0,60	1,4	0,93	1,0	0,83
As	5,3	4,6	3,8	8,3	8,0	5,3
Rb	22	22	17	23	15	20
Sr	390	57	105	64	93	110
Mo	14	20	9	36	11	14
Ba	290	220	305	240	330	300
Cd	0,48	0,81	1,0	3,4	1,1	0,99
Cs	0,60	1,8	0,86	1,3	0,80	0,61
La	7,3	10	22	5,0	8,5	8,4
Ce	17	20	32	9,2	18	18
Pr	2,1	2,9	6,2	1,3	2,5	2,3
Nd	8,3	14	28	6,8	10	9,2
Sm	1,7	2,7	5,6	1,7	2,4	1,9
Eu	0,32	0,38	0,69	0,22	0,42	0,38
Gd	1,7	3,4	6,3	2,2	2,8	2,2
Dy	1,4	3,9	6,4	2,5	3,0	2,1
Ho	0,29	0,99	1,3	0,56	0,64	0,37
сумма REE*	40	56	110	29	48	46
Pb	14	14	24	32	17	17
Bi	0,26	0,20	0,30	0,27	0,21	0,23
Th	1,1	2,2	3,4	0,83	1,1	1,2
U	24	16	8,1	85	12	13

Примечание: сумма REE* – сумма редкоземельных элементов

По разнице между концентрацией элементов в донных отложениях притоков и русла можно оценить вклад каждого притока в загрязнение основного рус-

ла. Как видно из таблицы, в донных отложениях притоков обнаруживается высокое содержание Be, Zn, Cd, U по сравнению с основным руслом. Напротив,

в донных отложениях основного русла наблюдается повышенное содержание Sr относительно притоков.

Факторы, определяющие распределение микроэлементов. Несмотря на отсутствие прямого определения гранулометрического состава, минералогических характеристик и содержания органического вещества донных отложений, выявленные закономерности распределения элементов позволяют оценить влияние основных геохимических процессов формирования донных осадков.

Формирование донных отложений ручья Карабулак происходит в условиях периодического пересыхания русла, образования локальных застойных участков и сезонной изменчивости водности. Подобные условия способствуют изменению интенсивности процессов осаждения, сорбции и десорбции химических элементов, а также перераспределению элементов между различными геохимическими формами.

Существенную роль в закреплении микроэлементов играют оксиды и гидроксиды железа и марганца, обладающие высокой сорбционной способностью. Значительная доля элементов, связанная с данной фракцией, свидетельствует о протекании процессов вторичной фиксации загрязняющих веществ в донных осадках. Напротив, преобладание водорастворимых и обменных форм указывает на высокую потенциальную миграционную способность элементов

и возможность их повторного вовлечения в водную среду при изменении гидрохимических условий.

Содержание Be в донных отложениях всех притоков значительно выше, чем в основном русле. Большой вклад в валовую концентрацию Zn, Cd и U происходит из притока 3, тогда как наибольшая концентрация Sr обнаруживается в донных отложениях основного русла. В донных отложениях притоков 3 и 4 наблюдается высокое содержание Mn, в несколько раз превышающее кларковые значения; также в притоке 4 больше железа. Для донных отложений притока 2 характерно повышенное содержание лантаноидов. По сумме редкоземельных элементов их содержание в среднем вдвое превосходит концентрации в основном русле и в остальных притоках.

Проведена оценка миграционной способности тех элементов, медианные концентрации которых в донных отложениях основного русла превышают кларковые значения: Be, Sr, Cd, Mo и U. На рисунке 2 показано изменение содержания форм Be по длине русла. Содержание бериллия во всех формах соединений изменяется неоднородно. Доля подвижных форм составляет десятые и сотые доли процента от валового содержания; в 2–3 км от истока доля водорастворимой формы возрастает примерно на порядок. Содержание слабоспецифически сорбированной и связанной с органическим веществом форм различается на 1–3 порядка: первая

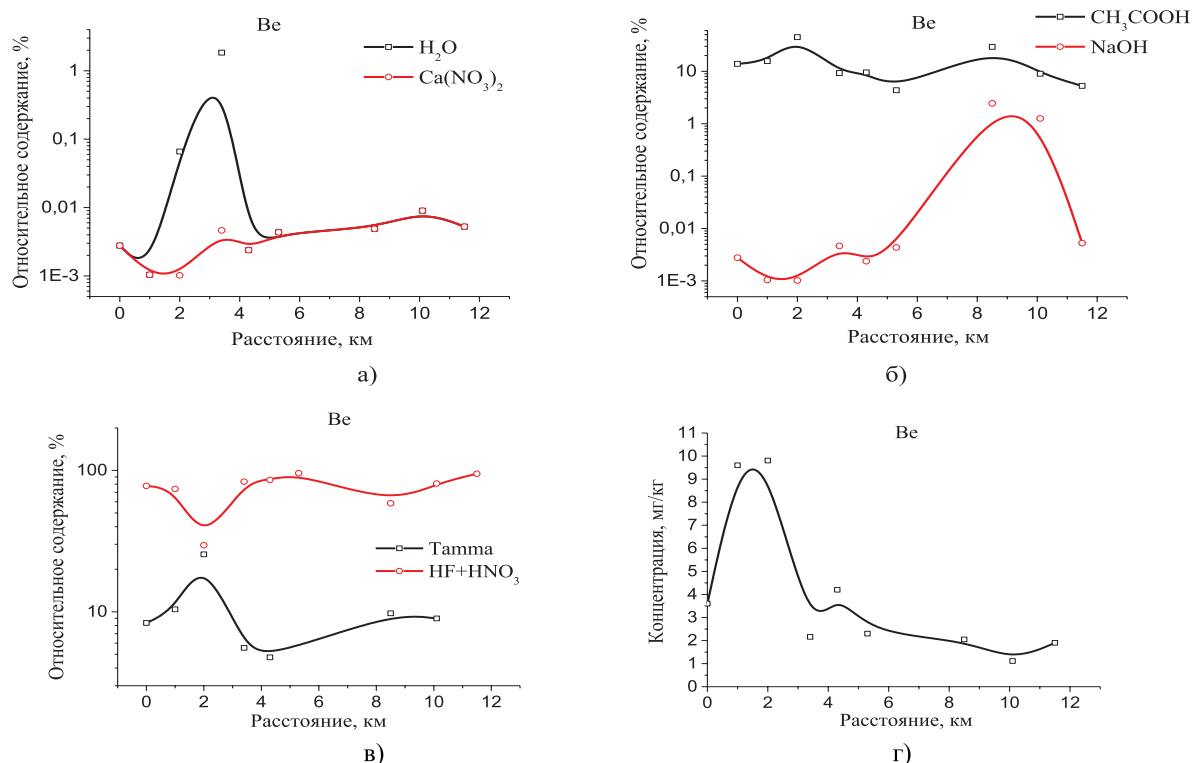


Рисунок 2. Изменение содержания форм соединений Be (а, б, в) и валового содержания Be (г) по длине русла ручья Карабулак

Примечание. Здесь и далее (рисунки 2–6): H_2O – водорастворимая форма; $Ca(NO_3)_2$ – обменная; CH_3COOH – слабоспецифически сорбированная; $NaOH$ – связанная с органическим веществом; реактив Тамма – связанная с оксидами и гидроксидами железа и марганца; $HF + HNO_3$ – остаточная.

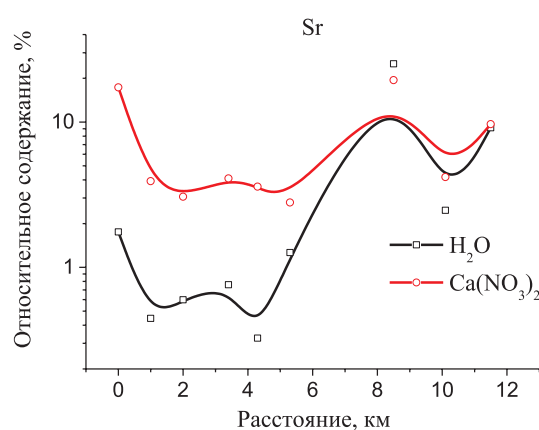
достигает 10 %, тогда как доля органической формы находится на уровне 0,01 % от валового содержания.

В интервале 8–10 км от истока ручья фиксируется выраженное возрастание концентрации бериллия в органически связанной форме, где его содержание достигает нескольких процентов. Для прочно фиксированных фракций также характерны различия порядка величины: около 10 % Be приходится на форму, связанную с оксидами и гидроксидами железа и марганца, однако наибольшая часть элемента сосредоточена в остаточной фракции. Максимальные значения содержания бериллия, превышающие кларковые уровни (до 9,8 мг/кг), выявлены в пределах 1–3 км от устья,

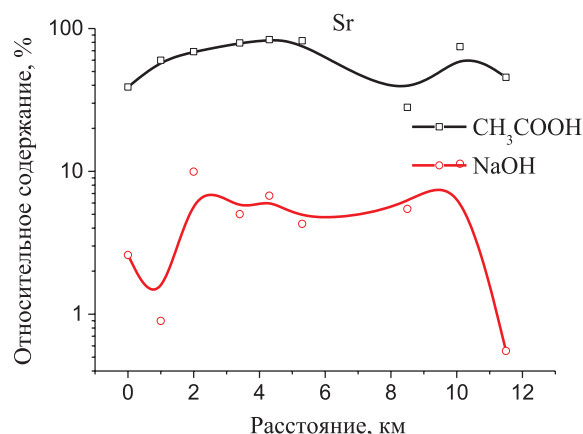
после чего по направлению вниз по течению отмечается уменьшение его концентрации в донных осадках.

Высокая доля остаточной формы бериллия свидетельствует о преимущественно литогенном происхождении данного элемента и его включенности в структуру минералов материнских пород. Одновременно локальное увеличение содержания водорастворимой формы может быть обусловлено изменением гидрохимических условий на отдельных участках русла либо поступлением элементов с поверхностным и подземным стоком.

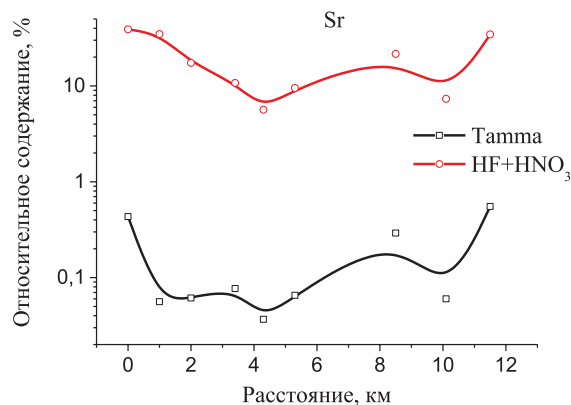
На рисунке 3 показано изменение содержания форм Sr по длине основного русла ручья.



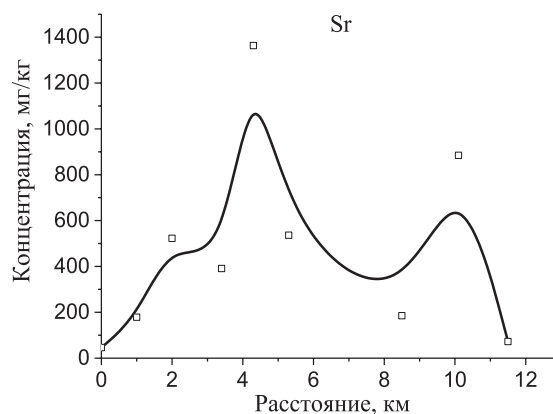
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3. Изменение содержания форм соединений Sr (а, б, в) и валового содержания Sr (г) по длине русла ручья Карабулак

Стронций в русле р. Карабулак в значительной степени находится в подвижных и слабо специфически сорбированных формах соединений. Для водорастворимой и обменной форм наблюдается схожесть пространственного распределения с повышением доли содержания ближе к устью ручья. Подавляющий процент содержания приходится на слабо специфически сорбированную форму – в среднем ее доля

составляет более 60 % от валового. При этом на органическую форму приходится около 5 % и ее показатель резко снижается к устью. Относительное распределение содержания в прочносвязанных формах по руслу ручья также демонстрирует определенное сходство – на остаточную форму приходится 20 % от валового, доля остаточной формы незначительна, менее 1 %. По валовому содержанию наблюдаются два

резких пика – до 1363 мг/кг в 4 км от истока, что в пять раз превышает кларковое значение, и до 884 мг/кг на 10-ом километре. К устью ручья содержание Sr резко снижается.

Высокая доля слабоспецифически сорбированной формы Sr обусловлена особенностями его геохимического поведения. Стронций сравнительно слабо

фиксируется кристаллической решеткой вторичных минералов и способен активно участвовать в процессах ионного обмена, вследствие чего характеризуется повышенной миграционной способностью в системе «донные отложения – вода».

На рисунке 4 показано изменение содержания форм Cd по длине основного русла ручья.

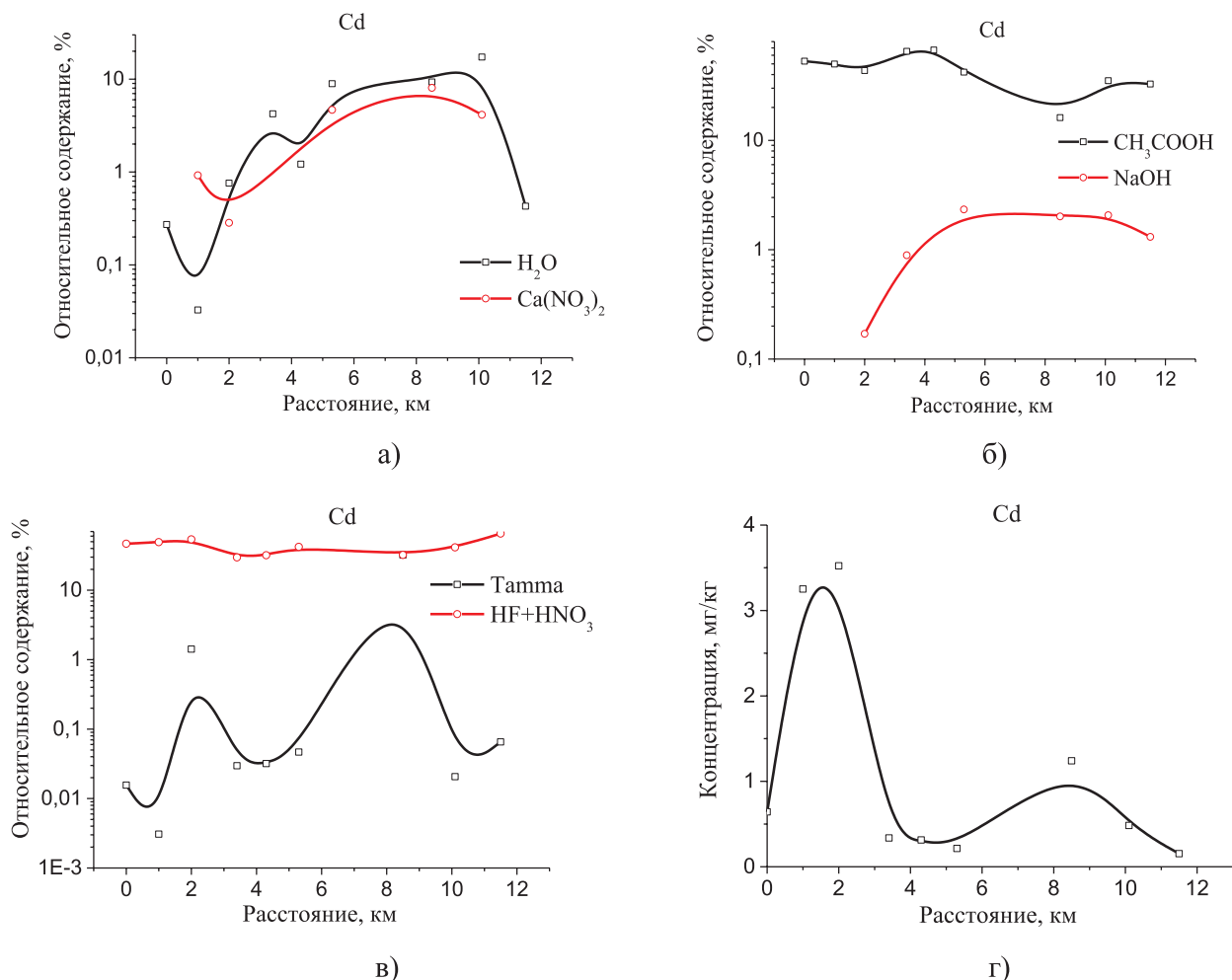


Рисунок 4. Изменение содержания форм соединений Cd (а, б, в) и валового содержания Cd (г) по длине русла ручья Карабулак

Основная часть кадмия в донных осадках представлена слабоспецифически сорбированной и остаточной формами, на долю которых приходится до 88 % от суммарного содержания элемента. Дополнительно около 8,9 % Cd ассоциировано с фракцией оксидов и гидроксидов железа и марганца. Подвижные формы характеризуются близким пространственным распределением и невысокими концентрациями, не превышающими 2 % от валового содержания. В распределении кадмия по руслу наблюдается следующая тенденция: максимальные концентрации (до 3,5 мг/кг) фиксируются на начальных участках водотока, в средней части русла на пересыхающих сегментах

отмечается снижение содержания ниже кларковых уровней, тогда как на расстоянии 8–10 км от истока регистрируется умеренное повышение концентраций до 1,2 мг/кг.

Преобладание остаточной и слабоспецифически сорбированной форм кадмия свидетельствует о сочетании процессов его природного накопления и вторичной фиксации поверхностью минеральных частиц. При изменении кислотности либо окислительно-восстановительного потенциала часть кадмия может переходить в более подвижные формы.

На рисунке 5 показано изменение содержания форм Mo по длине основного русла ручья Карабулак.

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ РУЧЬЯ КАРАБУЛАК
СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА**

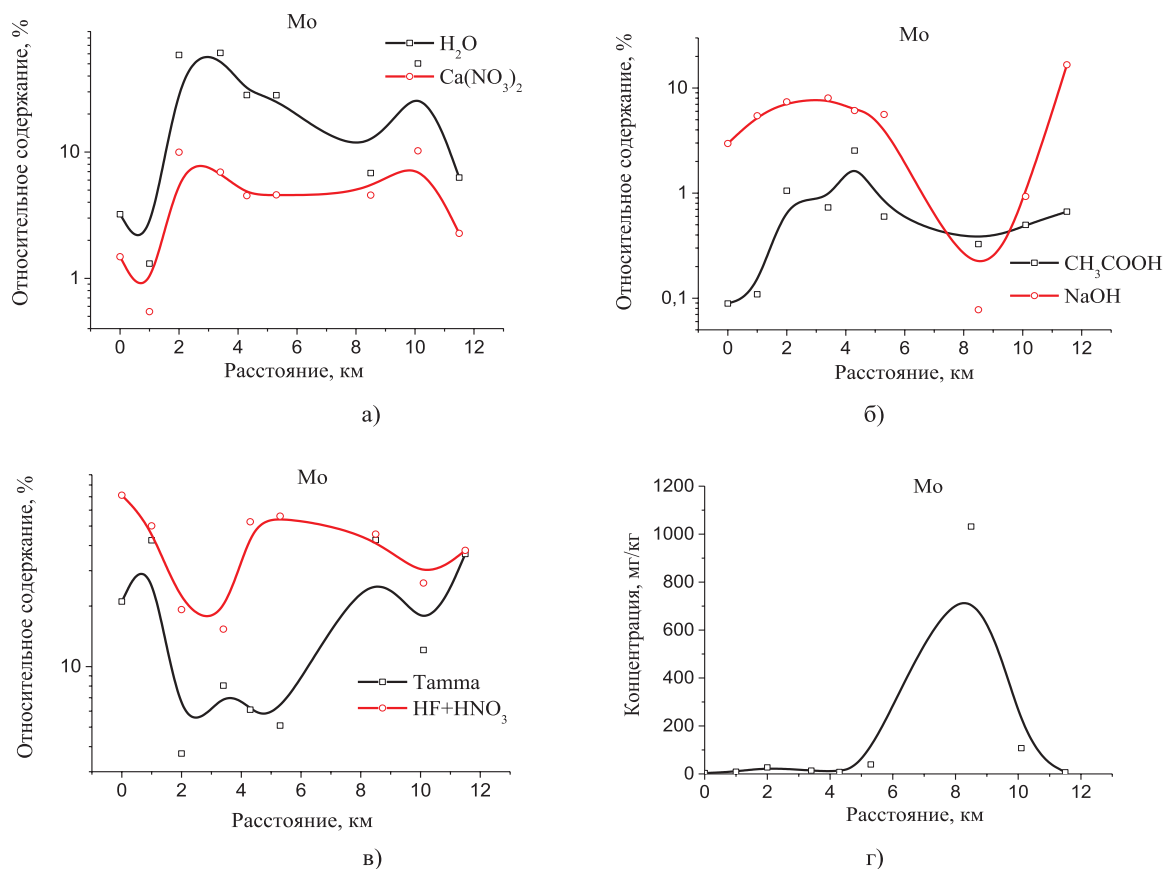
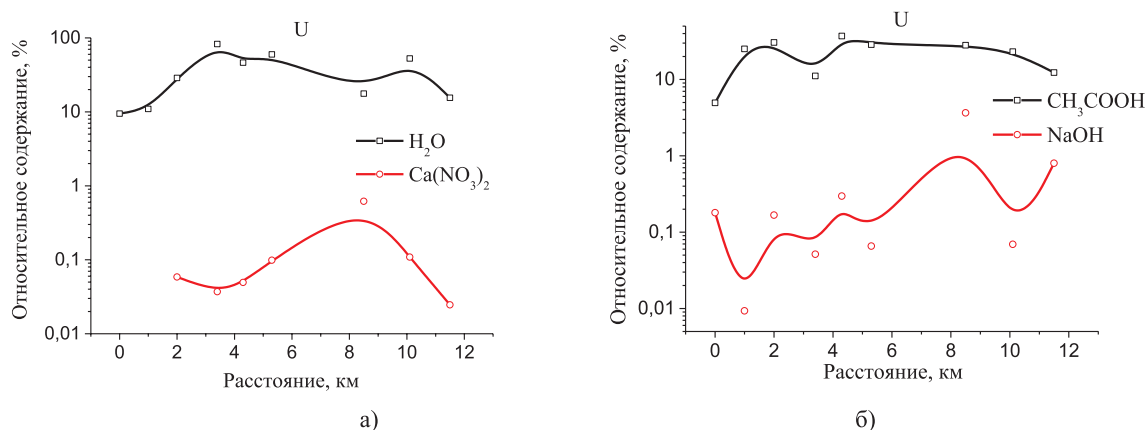


Рисунок 5. Изменение содержания форм соединений Мо (а, б, в) и валового содержания Мо (г) по длине русла ручья Карабулак

Для молибдена характерна сходная картина нахождения в легко связанных формах на всём протяжении русла, при этом среднее содержание в водорастворимой форме превышает содержание в обменной и составляет 19 %. Доля нахождения в слабо специфически сорбированной форме незначительна и в среднем не превышает 2 %. В прочносвязанных формах также прослеживается сходный характер изменения содержания по длине русла между остаточной и осадочной формами. По валовому содержанию в русле наблюдается пиковое повышение концентрации до 1030 мг/кг от истока. 9 км

Для молибдена существенное значение имеют окислительно-восстановительные условия среды. Известно, что в окислительной обстановке молибден существует преимущественно в виде растворимых молибдат-ионов, тогда как восстановительные условия способствуют его сорбции оксидами железа и органическим веществом. Это объясняет неоднородность изменения содержания элемента по длине русла.

На рисунке 6 показано изменение содержания форм U по длине основного русла ручья.



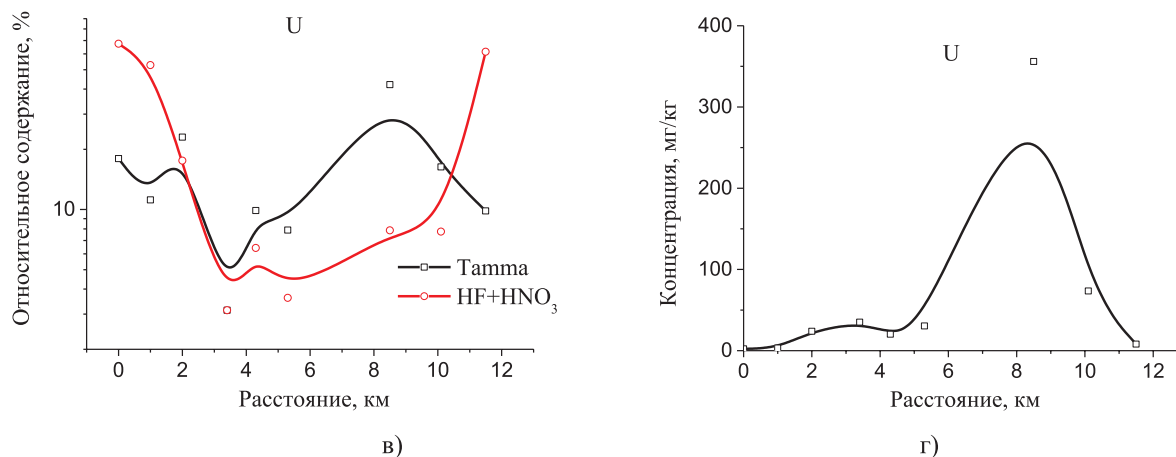


Рисунок 6. Изменение содержания форм соединений U (а, б, в) и валового содержания U (г) по длине русла ручья Карабулак

Для урана характерно высокое содержание в водорастворимой форме (в среднем 32 %), следовательно, U отличается высокой подвижностью и степенью потенциального воздействия на биообъекты. Уровни содержания в прочносвязанных формах колеблются от единиц до десятков процентов, при этом наблюдается общая тенденция к более высоким содержаниям ближе к истоку (0–2 км) и устью (8–12 км), тогда как на 5–7 километре содержание урана значительно ниже.

Содержание урана в водорастворимой фракции достигает значений на уровне десятков процентов от валового содержания, тогда как в обменной форме его доля на два порядка ниже. Существенные различия также установлены между органически связанной и слабоспецифически сорбированной формами: в последней фиксируются значения на уровне десятков процентов, тогда как в органической форме содержание урана ограничивается долями процента. По валовому содержанию элемента отмечен выраженный максимум на расстоянии 9–10 км от истока, где концентрация достигает 360 мг/кг, что превышает кларковое значение примерно на два порядка.

Высокая доля водорастворимой формы урана указывает на преобладание его наиболее мобильных соединений. Подобная особенность может быть связана с поступлением урана с подземными водами, разгружающимися в пределах водотока, а также с особенностями гидрогеохимических условий территории горного массива Дегелен. Одновременно наличие значительной доли остаточной формы свидетельствует о существовании устойчивого природного геохимического фона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геохимические особенности распределения форм элементов в донных осадках основного русла и притоков ручья Карабулак характеризуются значительной пространственной неоднородностью, обусловленной, прежде всего, сезонным пересыханием отдельных

участков водотока и формированием зон застоя воды. В частности, в нижних участках русла наблюдается накопление элементов, отличающихся низкой миграционной способностью. Распределение повышенных концентраций различных форм исследованных элементов характеризуется значительным варьированием значений, достигающим нескольких порядков величины. Минерализованные зоны в пределах долины ручья Карабулак имеют выраженный локальный характер распространения.

В большинстве случаев фиксируется закономерность возрастания абсолютных концентраций форм соединений элементов при переходе от наиболее подвижных к наиболее устойчиво закрепленным фракциям. Распределение элементов по формам соединений отражает не только их миграционные свойства, но и связано с общим уровнем их накопления. Так, в донных осадках притоков, характеризующихся повышенными концентрациями Be, Zn и Sr, указанные элементы преимущественно находятся в более подвижных формах, тогда как при относительно низких концентрациях возрастает доля их присутствия в прочно фиксированных фракциях. Повышенная подвижность и растворимость элементов способствует их последующему накоплению в донных осадках.

На основании различий в концентрациях элементов между основным руслом и усредненными значениями по всей водной системе проведена оценка вклада притоков в загрязнение основного русла. Установлено существенное влияние притоков на поступление Be, Zn, Cd и U, тогда как повышенные концентрации Sr преимущественно характерны для основного русла.

Выявлены значительные превышения кларковых значений по ряду элементов: для урана – до пятикратного превышения (среднее содержание около 13 мг/кг при максимальных значениях до 360 мг/кг); для бериллия – при среднем уровне 9,6 мг/кг и максимальной концентрации до 46 мг/кг; для молибдена – при

среднем содержании около 14 мг/кг, что примерно в девять раз выше кларкового уровня, с пиковыми значениями до 1030 мг/кг; а также для кадмия – при среднем содержании около 0,99 мг/кг и максимальных значениях до 4,4 мг/кг. Для верхнего течения ручья характерны повышенные концентрации Be, Sr и Cd, тогда как содержание Mo и U возрастает по направлению к устьевой части водотока.

Установлено, что содержание бериллия в донных осадках притоков в среднем на порядок превышает его концентрации в основном русле. Существенный вклад в поступление Zn, Cd и U связан преимущественно с притоком 3, тогда как наибольшее содержание Sr отмечено в основном русле. В притоках 3 и 4 зафиксированы повышенные концентрации марганца, при этом в притоке 4 также отмечено повышенное содержание железа. Для притока 2 характерно накопление лантаноидов: суммарное содержание редкоземельных элементов здесь в среднем примерно в два раза превышает соответствующие значения в основном русле и других притоках.

Показано, что уран в донных отложениях основного русла преимущественно присутствует в водорастворимой форме, что свидетельствует о его высокой миграционной способности и потенциальной биодоступности. В то же время в притоках уран в большей степени связан с более устойчивыми геохимическими формами. Полученные результаты позволяют уточнить особенности миграции и аккумуляции микроэлементов в водных экосистемах территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона и могут быть использованы при проведении экологического мониторинга и оценке экологических рисков в данном регионе.

Следует отметить, что интерпретация механизмов закрепления микроэлементов может быть существенно расширена при совместном исследовании гранулометрического состава, минералогических особенностей, содержания органического вещества, а также кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных характеристик донных отложений. Комплексное рассмотрение указанных факторов является перспективным направлением дальнейших исследований.

Исследование финансировалось Агентством Республики Казахстан по атомной энергии в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН – BR24792713), а также за счет грантового финансирования АР19576259 «Экологическая оценка малых рек как показатель трансформации геосистем горнодобывающих районов Восточного Казахстана»

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES:

1. Дюсембаева М.Т. Эколого-геохимические особенности некоторых водных объектов Семипалатинского испытательного полигона / М.Т. Дюсембаева, Н.Ж. Мухамедияров, Г.М. Есильканов, А.Ж. Ташекова, А.О. Айдарханов. – Курчатов : ИД «Интеллект», 2023. – 268 с.
2. Березин С.А. и др. Мирные ядерные взрывы на территории Казахстана // Вестник НЯЦ РК. – 2001. – №7(3). – С. 57-62.
3. Батырбеков Э.Г., Айдарханов А.О., Витюк В.А. и др. Комплексное радиоэкологическое обследование Семипалатинского испытательного полигона: монография. – Курчатов, 2021. – 340 с.
4. Айдарханова А.К., Лукашенко С.Н., Коростелева С.В. Исследование сорбционных свойств грунтов участка ручья Карабулак // «Вестник НЯЦ РК». – 2015 – №1 (61). – с. 75-84
5. Торопов А.С., Рихванов Л.П., Есильканов Г.М. Пространственное распределение форм нахождения радионуклидов в воде ручья Карабулак Семипалатинского испытательного полигона // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. –2017. –Т. 328. –№ 12. –С. 6–15. URL: <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/1954>
6. Р.Г. Ермакова, А.К. Айдарханова, Ж.Е. Тлеуканова, А.С. Мамырбаева Исследование вертикального распределения техногенных радионуклидов в донных отложениях водотоков площадки «Дегелен» // «Вестник НЯЦ РК». – 2024 – №4 (61). – с. 128-137 <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-4-128-137>
7. Геохимический фон СИП. Микроэлементы в почвах участков, прилегающих к горному массиву Дегелен» /А.А. Амиров, С.Н. Лукашенко, С.Б. Субботин, В.Д. Кириллов, В.П. Солодухин, Н.М. Бердинова, Д.А. Желтов // Актуальные вопросы радиэкологии Казахстана: Вып. 2 Сборник трудов Института радиационной безопасности и экологии за 2007–2009 гг. –Павлодар: Дом печати, 2010. –С. 451–460.6.
8. Шакенов Е.З., Дюсембаева М.Т, Лукашенко С.Н., Темиржанова А.Е., Есильканов Г.М., Мухамедияров Н.Ж. Пространственное распределение химических элементов в водотоке штольни 504 площадки «Дегелен» // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 9. 70–83 и др.
9. Есильканов Г.М. Оценка элементного состава воды ручья Карабулак (площадка «Дегелен» бывшего Семипалатинского испытательного полигона) / Г. М. Есильканов, Н. Ж. Мухамедияров ; науч. рук. Л.П. Рихванов ; М.Т. Койгельдинова // Творчество юных – шаг в успешное будущее : материалы VIII Всероссийской научной студенческой конференции с элементами научной школы имени профессора М.К. Коровина, г. Томск, 23-27 ноября 2015 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2015. – [С. 239-240].
10. Tessier A, Rapin F., Garignan R. Trace metals in oxic lake sediments: possible adsorption onto iron oxyhydroxides // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1985. Vol.49, N1.
11. Ладонин Д.В. Соединения тяжелых металлов в почвах – проблемы и методы изучения // Почвоведение. – 2002. – № 6. – С. 682-692.
12. 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 2013г. – С. 130-134.

13. Ладонин Д.В. Формы соединений тяжелых металлов в техногенно-загрязненных почвах. Диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук. Москва – 2016.
14. Н.А. Григорьев – Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры. – Геохимия, 2003. – №7. – с. 785-792.
15. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: гигиенические нормативы (ГН 2.1.7.2041-06). – М.: Информ.-издат. Центр Госкомсанэпиднадзора России, 2006.

**ҚАРАБҰЛАҚ ЖЫЛҒАСЫНЫҢ ТҮПТІК ШӨГІНДІЛЕРІНДЕГІ
МИКРОЭЛЕМЕНТТЕРДІҢ ТАРАЛУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ (СЕМЕЙ СЫНАҚ ПОЛИГОНЫ)**

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

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

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

Бұл мақалада Семей сынақ полигонының Дегелең тауларында орналасқан Қарабұлақ өзенінің түбіндегі шөгінділердегі микроэлементтердің кеңістіктік таралуы мен пайда болу формаларын зерттеу нәтижелері ұсынылған. Негізгі өзен арнасы мен оның төрт саласы бойындағы 19 нүктеден түбіндегі шөгінді үлгілері алынды. Химиялық элементтердің пайда болу формаларын анықтау үшін тізбекті экстракция әдісі қолданылды. Бұл әдіс суда еритін, алмасатын, әлсіз арнайы сорбцияланған, органикалық заттармен байланысқан, темір және марганец оксиді мен гидроксидімен байланысқан және қалдық формаларды бөліп алуға мүмкіндік береді. Элементтерді сандық анықтау ICP-MS және ICP-AES әдістерін қолдану арқылы жүргізілді. Түбіндегі шөгінділердегі микроэлементтердің таралуы өзеннің гидрологиялық сипаттамаларына және бұрынғы сынақ полигонының антропогендік әсеріне байланысты айтарлықтай кеңістіктік гетерогенділікпен сипатталатыны анықталды. Бірқатар элементтер, ең алдымен уран, бериллий, молибден және кадмий бойынша кларк мәндерінің асып кетуі анықталды. Be, Sr және Cd ең жоғары концентрациясы өзеннің жоғарғы ағысында байқалды, ал Mo және U мөлшері төменгі ағысында артты. Негізгі арнаның түбіндегі шөгінділердегі уран негізінен суда еритін түрінде екені көрсетілді, бұл оның жоғары миграциялық қабілетін және қоршаған ортаға ықтимал қауіп төндіретінін көрсетеді.

Түйін сөздер: түбіндегі шөгінділер, микроэлементтер, тізбекті экстракция, кеңістіктік таралуы, ауыр металдар, уран, сирек кездесетін жер элементтері, Семей сынақ полигоны.

**DISTRIBUTION FEATURES OF TRACE ELEMENTS IN BOTTOM SEDIMENTS
OF THE KARABULAK STREAM, SEMIPALATINSK TEST SITE**

M. T. Dyusembayeva, A.Zh. Tasheкова*, S.E. Salmenbaev, S.D. Smirnov, N.K. Nurgaisinova

Branch of the Institute of Radiation Safety and Ecology, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

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

This article presents the results of a study of the spatial distribution and occurrence forms of trace elements in the bottom sediments of the Karabulak Stream, located within the Degelen Mountains of the Semipalatinsk Test Site. Bottom sediment samples were collected at 19 points along the main stream channel and its four tributaries. A sequential extraction method was used to determine the occurrence forms of chemical elements. This method allows for the isolation of water-soluble, exchangeable, weakly specifically sorbed, organic matter-bound, iron and manganese oxide- and hydroxide-bound, and residual forms. Quantitative determination of elements was performed using ICP-MS and ICP-AES. It was established that the distribution of trace elements in the bottom sediments is characterized by significant spatial heterogeneity due to the hydrological characteristics of the stream and the anthropogenic impact of the former test site. Exceedances of Clarke values were detected for a number of elements, primarily uranium, beryllium, molybdenum, and cadmium. The highest concentrations of Be, Sr, and Cd were observed in the upper reaches of the stream, while Mo and U contents increased in the lower reaches. Uranium in the bottom sediments of the main channel was shown to be predominantly in a water-soluble form, indicating its high migration capacity and potential environmental hazard.

Keywords: bottom sediments, trace elements, sequential extraction, spatial distribution, heavy metals, uranium, rare earth elements, Semipalatinsk Test Site.