



Научная статья

ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЗАГРЯЗНЕННОГО УЧАСТКА РЕКИ ШАГАН

Арай Е. Темиржанова^{1*}, Жанат А. Байгазинов², Нурлан Ж. Мухамедияров³, Медет Р. Актаев⁴,
Касым К. Дускаев¹

¹ Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; temirzhanova.aray@mail.ru (АЕТ), kduskaev@gmail.com (ККД)

² АО «Парк ядерных технологий», Курчатов, Казахстан; zh.baigazinov@gmail.com (ЖАБ)

³ НАО «Университет имени Шакарима», Семей, Казахстан; nurlan.eventumlab@gmail.com (НЖМ)

⁴ ТОО «Baiterek Engineering», Астана, Казахстан; medet_aktaev@mail.ru (МРА)

*Автор корреспонденции: Арай Е. Темиржанова, temirzhanova.aray@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

река,
загрязнение,
химические элементы,
донные отложения,
индекс геоаккумуляции

АБСТРАКТ

Проблема радиоактивного и химического загрязнения природных водных объектов сохраняет свою актуальность в районах, подвергавшихся испытаниям ядерного оружия. Одним из таких объектов является река Шаган, расположенная на территории Семипалатинского испытательного полигона. Особое значение имеет участок русла реки «старое русло», где зафиксирована разгрузка загрязненных подземных и трещинных вод в поверхностный водоток.

Цель исследования заключается в выявлении особенностей накопления химических элементов в донных отложениях «старого русла» реки Шаган.

Научная и практическая значимость работы состоит в уточнении представлений о процессах миграции и аккумуляции химических элементов в условиях локализованных источников радиационного загрязнения. Полученные данные позволяют выявить общие закономерности трансформации геохимического фона рек, подверженных длительному техногенному воздействию, что важно для разработки систем мониторинга и прогноза экологического состояния подобных территорий.

Методология исследования включала полевые работы с отбором проб, лабораторные исследования с применением количественных методов анализа (атомно-абсорбционная спектрометрия, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой), статистическую обработку данных и построение тематических карт в ГИС. Загрязнение донных отложений химическими элементами определялось на основе индекса геоаккумуляции (Igeo) и сопоставления концентраций элементов с их кларковыми значениями.

Основные результаты показали, что в пределах исследуемого участка «старого русла» по кларкам концентраций установлены геохимические ряды, отражающие превышение среднего содержания элементов в верхней части континентальной коры ($Sr > U > Ca$) и в глинистых сланцах ($Sr > Ca > U > Na > Mg$). Анализ по индексу геоаккумуляции (Igeo) показал, что донные отложения р. Шаган варьируют от «незагрязненных» до «сильно загрязненных»: по содержанию Li, Mg, K, Fe они отнесены к 0 классу, по Na и U - к классам 1 и 2 (от незагрязненных до умеренно загрязненных), тогда как по Ca и Sr - к 3 классу (от умеренно до сильно загрязненных).

Ценность исследования заключается во внесении нового фактического материала о геохимических особенностях радиоактивно загрязненных речных систем, а также в создании базы для последующих работ по оценке риска для экосистем и человека. Практическое значение полученных итогов заключается в возможности их применения при организации природоохранных мероприятий и долгосрочного экологического мониторинга.

По статье:

Получено: 30.09.2025

Пересмотрено: 03.10.2025

Принято: 05.10.2025

Опубликовано: 08.10.2025

Для цитирования:

Темиржанова А., Байгазинов Ж., Мухамедияров Н., Актаев М., Дускаев К. Химические элементы донных отложений загрязненного участка реки Шаган// Гидрометеорология и экология, 119 (4), 2025, 190-204.

1. ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия выполнено значительное число комплексных исследований, посвященных радиоэкологической оценке компонентов р. Шаган [1...6]. Тем не менее, научный интерес к этой реке остается высоким. Одной из ключевых причин является наличие участков с концентрациями техногенного радионуклида ^{3}H , превышающими нормативные значения в десятки раз, что обуславливает актуальность и обоснованность выбора данной темы.

В частности, в работе [7] были выделены зоны с аномально высоким уровнем радиоактивности. К ним относятся район разгрузки загрязненных подрусловых и трещинных вод на поверхностные воды реки (участок на 5-м км); отрезок между 8 и 14 км, где трещинные воды поступают в грунтовые воды поймы р. Шаган и далее разгружаются в поверхностный водоток, а также сегмент «старого» русла с водопроявлениями из зоны навалов «Атомное озеро» также с разгрузкой загрязненных подрусловых и трещинных вод на поверхностные воды реки (рисунок 1).



Рисунок 1. Основные участки загрязнения вод р. Шаган

Примечание – составлено авторами

Вместе с тем, наряду с изучением радиоактивных компонентов, актуальной остается проблема оценки элементного состава воды и донных отложений, который в значительной мере определяет геохимический фон данного региона. Несмотря на проведенные работы, систематический мониторинг химического состояния экосистемы р. Шаган отсутствует. Изучение содержания загрязняющих элементов [8...10], формирующих характерный «геохимический портрет» реки, носило фрагментарный характер и проводилось в рамках отдельных научно-исследовательских проектов. При этом наиболее уязвимые участки водотока, описанные выше и подверженные постоянному поступлению загрязненных подземных вод, остаются недостаточно охарактеризованными.

Ситуация осложняется хозяйственной деятельностью в пойме р. Шаган и изменениями климата, особенно заметными для малых рек [11...14]. Река Шаган, являясь малой и выступая притоком более крупного водотока р. Ертис, изначально представляет собой хрупкую экосистему, особенно уязвимую в условиях аридного

климата степной зоны в пределах Казахского мелкосопочника. В условиях дефицита пресной воды на аридных территориях проблема качества таких водных объектов приобретает особую значимость. Поддержание их экологической устойчивости требует постоянного мониторинга, предотвращения дальнейшего засоления и загрязнения, а также разработки мер по восстановлению для минимизации риска деградации экосистем изучаемого региона.

Объектом исследования является загрязненный участок р. Шаган, подверженные радиоактивному и химическому воздействию. Предмет исследования – содержание химических элементов в составе донных отложений и их пространственное распределение.

Цель данного исследования заключается в установлении концентрации химических элементов в донных отложениях уязвимого участка р. Шаган зоны разгрузки загрязненных трещинных и подрусловых вод сегмента «старого» русла с водопроявлениями из зоны навалов «Атомное озеро» и их оценке качества на основе геохимических и критериев (сопоставление значений с геохимическим фоном, геохимические классы качества по литературе [15]).

Задачи исследования включают следующие этапы: проведение полевых работ и отбор проб донных отложений; лабораторно-аналитический анализ - определение микро- и макроэлементов состава донных отложений; камеральная обработка данных - статистический анализ, интерпретация результатов с применением ГИС-технологий, расчет по геохимическим критериям, основанным на содержании химических элементов в донных отложениях зонах разгрузки подземных вод на участке «старого» русла.

В исследовании применяются полевые методы отбора проб, лабораторно-аналитические методы для определения состава воды, статистический и ГИС-анализ для обработки и интерпретации данных, а также применение геохимических критериев.

Гипотеза исследования заключается в том, что пространственное распределение химических элементов в воде и донных отложениях р. Шаган определяется сочетанием геохимических процессов и влиянием радиоактивного загрязнения, что позволяет использовать их как индикаторы состояния экосистемы. В настоящее время исследования по концентрациям химических элементов в донных осадках в значительной степени связаны с оценкой потенциального экологического риска и токсичности [16...18]. Для этого применяются различные подходы: геохимический, позволяющий определить степень загрязнения по сравнению с естественным, региональным фоном и индекс геоаккумуляции (I_{geo}) [19].

Предлагаемое исследование обладает научной новизной, так как направлено на уточнение роли геохимических процессов в формировании химического состава донных отложений в условиях радиоактивного воздействия. Его значимость заключается в расширении фактической базы данных о радиоэкологически трансформированных речных системах и создании основы для разработки систем долгосрочного мониторинга и природоохранных мероприятий для подобных экосистем.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб.

Река Шаган является важным природным объектом, характеризующимся сочетанием современного и «старого» русел, что делает ее удобной моделью для изучения процессов накопления и миграции загрязняющих веществ. Такой подход позволяет более полно отразить текущее состояние водоема и получить данные для последующего сравнения с аналогичными объектами региона. В основу исследования легли результаты полевых работ, проведенных в сентябре 2024 года на участках

«старого русла» р. Шаган. Точки отбора проб были привязаны к координатам с использованием GPS-навигатора Garmin eTrex. В ходе экспедиции собраны образцы донных отложений на заранее обозначенных участках исследуемого русла, где ранее проводили отбор проб воды. Интервал между точками отбора составлял около 20...30 м и корректировался в зависимости от особенностей берегового рельефа. Всего было выделено 7 точек, где осуществлялся отбор проб. Отбор проб донных отложений проводился в «условных» пределах «старого» русла реки, из верхнего слоя донных отложений на глубине 0–10 см (рисунок 2).

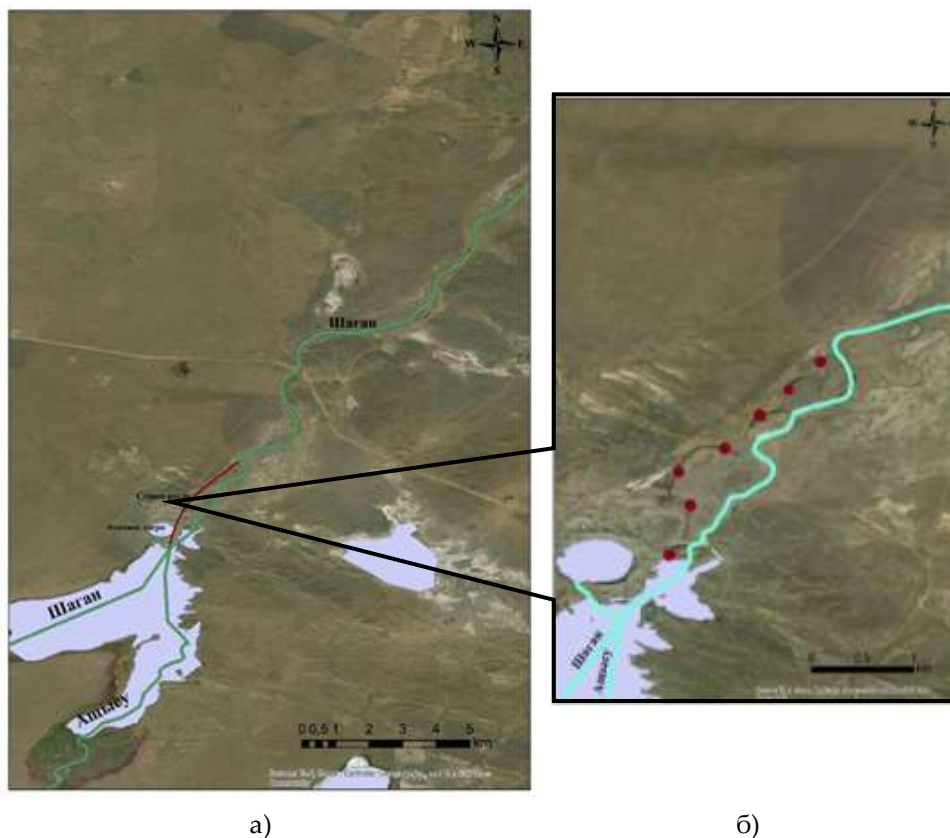


Рисунок 2. Участок исследования р. Шаган (а), точки отбора проб по «старому» руслу (б)

Примечание – составлено авторами

Донные отложения для элементного анализа отбирались в местах пробоотбора воды методом укола. Оборудование изготовлено из инертного материала, что обеспечивало достоверность и чистоту отбора. Каждая проба донных отложений массой около 200 г помещалась в контейнеры из инертных материалов во избежание вторичного загрязнения и транспортировались в лабораторию с соблюдением температурного режима, исключающего их разложение или изменение состава. Соблюдение стандартов позволило сохранить исходные характеристики проб и обеспечить достоверность полученных аналитических данных.

Пробоподготовка.

Пробы донных отложений высушивались при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния. Высушенные образцы просеивались через полиамидные сита различного диаметра, после чего методом квартования делились на пять частей. Из каждой части отбирались равные порции, для формирования объединенной пробы, массой около 10 г, которая дополнительно просеивалась через сито с диаметром ячеек <1 мм. Полученные фракции измельчались до пудрообразного состояния и гомогенизировались. Навески массой 1 г получались методом квартования, после чего

из каждой пробы взвешивались по 0.2 мг на аналитических весах с точностью ± 0.0001 г.

Подготовка образцов к элементному анализу проводилась методом автоклавного разложения с применением фтористоводородной (HF), соляной (HCl) и азотной (HNO₃) концентрированных кислот марки «осч». Для удаления органической составляющей дополнительно использовалась концентрированная перекись водорода (H₂O₂). Минерализация выполнялась в герметичных автоклавах при температуре 160 ± 5 °C в течение 2.5...4 ч, в зависимости от полноты разложения (до полного растворения силикатной матрицы). В каждой партии вместе с анализируемыми растворами проводят разложение 1 контрольного образца, а также одного стандартного образца (если иное не указано в ТЗ). Полученные растворы разбавлялись 1% HNO₃ в соотношении 1:10 и передавались на анализ.

Лабораторный анализ.

Содержание микроэлементов в составе донных отложений определялось с использованием метода атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Были использованы приборы SavantAA производства GBC Scientific Equipment, Австралия и SUPEC 7000, производства EXPEC TECHNOLOGY, Китай. Калибровка проводилась с использованием сертифицированных мультиэлементных стандартных образцов (Perkin Elmer, Inorganic Ventures, США). Для контроля воспроизводимости результатов и учета потерь при пробоподготовке дополнительно применялись стандартные образцы твердого состава (БИЛ-1). Метод изотопных меток с использованием изотопов Yb позволил повысить точность количественного анализа. Значения относительного стандартного отклонения (RSD) не превышали 10 %. Качество измерений контролировалось по контрольному раствору, который анализировали после каждых десяти проб; при отклонении калибровочного графика на 8...10 % выполнялась повторная калибровка прибора. Измерения исследуемых проб выполнялись по методике ГОСТ Р 57162-2016 (ISO 15586:2003, NEQ).

Вариационно-статистический и корреляционный анализ полученных данных был проведен с применением методов математической описательной статистики с использованием программного обеспечения Statistica 13.0 и Microsoft Excel. На основании полученных результатов содержания химических элементов в образцах донных отложений были рассчитаны ключевые эколого-геохимические показатели - кларк концентрации (Kk) [15], индекс геоаккумуляции (Igeo) [19], позволяющий оценить уровень техногенного воздействия относительно геохимического фона.

Кларк концентрации (Kk)

$$K_k = \frac{C_{\text{проба}}}{C_{\text{кларк}}} \quad (1)$$

где, $C_{\text{проба}}$ - концентрация элемента в исследуемом образце (мг/кг); $C_{\text{кларк}}$ - средняя концентрация этого элемента в земной коре (мг/кг) [15]

Индекс геоаккумуляции (Igeo)

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C_n}{1.5 \times B_n} \quad (2)$$

где, C_n - концентрация анализируемого элемента в донных отложениях, B_n - геохимический фон для анализируемого элемента [15], 1.5 - коэффициент, учитывающий литологическую изменчивость водосбора.

Построение карт-схем и пространственная визуализация результатов были выполнены с применением методов геоинформационного анализа. Обработка данных осуществлялась в программной среде ArcGIS 10.8 for Desktop (ESRI) с

использованием дополнительных модулей Geostatistical Analyst и инструментов Xtools. Проведённые методы статистической и пространственной обработки позволили выявить закономерности распределения химических элементов в исследуемой среде и установить статистически значимые взаимосвязи между их содержанием и факторами окружающей среды.

Таблица 1*Классификация донных осадков по Igeo*

Значение Igeo	Класс	Степень загрязнения
<0	0	Не загрязнено
0...1	1	От незагрязненного до умеренно загрязненного
1...2	2	Умеренно загрязнено
2...3	3	От умеренно до сильно загрязненного
3...4	4	Сильно загрязнено
4...5	5	От сильно до очень сильно загрязненного
>5	6	Очень сильно загрязнено

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С целью оценки текущего гидрохимического состояния и уточнения ранее полученных данных по р. Шаган [9...10] проведен анализ элементного состава донных отложений на загрязненном участке. В таблице 2 представлены данные о содержаниях группы химических элементов в донных отложениях, отобранных на участке сегмента «старого» русла с водопроявлениями из зоны навалов «Атомное озеро», которое имеет выход затем в поверхностный водоток основного русла р. Шаган. Степень загрязнения донных отложений изучаемыми группами элементов исследуемого участка р. Шаган определяли с использованием таких показателей, как кларк концентрации (K_k) и индекс геоаккумуляции (Igeo) [19...20].

Таблица 2*Содержание химических элементов в донных отложениях загрязненного участка р.Шаган, мг/кг n=7*

№ пробы	Li	Na	Mg	K	Ca	Fe	Sr	U
1	8.1	14500	15100	7500	226000	16700	2360	12.0
2	15.0	16100	19300	7500	274000	23200	3030	43.0
3	9.2	12100	14800	4360	230000	18000	2270	35.0
4	15.8	26000	18900	13900	173000	32600	2240	8.5
5	15.7	26000	18700	13900	170000	32300	2240	8.4
6	11.0	18000	13900	8150	141000	27200	1580	28.0
7	9.7	19000	20900	3500	245000	93300	2900	14.0
$\bar{X} \pm \text{SEM}$	12.1±1.2	18800±2040	17400±1030	8400±1600	208600±18000	34800±10000	2400±180	21.0±5.3
Me	11.0	17900	18700	7500	226000	27200	2300	14
σ	3.2	5400	2700	4100	48000	26600	490	14
Min	8.1	12100	13900	3500	141000	16700	1580	8.4
Max	15.8	26000	20900	13900	274000	93300	3030	43
$C_v, \%$	27	29	16	49	23	76	21	65

Примечание: $\bar{X}$ - среднее арифметическое; SEM - стандартная ошибка среднего; σ - стандартное отклонение; Min - минимум; Max - максимум; Me - медиана; C_v - коэффициент вариации.

Концентрации исследованных химических элементов в донных отложениях исследуемого участка р. Шаган распределяются в убывающем порядке следующим образом: $\text{Ca} > \text{Fe} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Sr} > \text{U} > \text{Li}$. Проведенный расчет коэффициента вариации показал, что изменчивость содержания химических элементов в донных отложениях находилась в пределах 16...76 %, охватывая диапазон от низкой до высокой вариабельности. Значения, близкие к нижней границе (до 20 %), свидетельствуют о достаточно однородном распределении Mg в пространстве, тогда как показатели, превышающие 40 % K (49 %), U (65 %), Fe (76 %), отражают существенную неоднородность и локальные различия в накоплении этих элементов. Подобная картина может указывать на различия в интенсивности внешних источников поступления химических элементов, а также на влияние локальных гидродинамических и геохимических условий, формирующих пространственную неоднородность донных отложений. Также выделена группа элементов (Sr, Ca, Li, Na) с коэффициентом вариации от 20...30 %. Данные значения свидетельствуют о том, что пространственное распределение концентраций Sr, Ca, Li, Na в донных отложениях отличается менее выраженной неоднородностью и может быть охарактеризовано как средняя степень изменчивости.

Также был проведен сравнительный анализ (рисунок 3) содержания исследуемых групп химических элементов в составе донных отложений с литературными данными, в частности со средними концентрациями в верхней части континентальной коры и глинистых сланцах [15]. Согласно приведенным значениям, для верхней части континентальной коры характерны следующие показатели (мг/кг): Li - 33, Na - 20700, Mg - 17700, K - 22300, Ca - 38900, Fe - 40600, Sr - 270, U - 2,5 а для глинистых сланцев эти величины составляют соответственно: Li - 54, Na - 10 200, Mg - 16 500, K - 27 300, Ca - 22 100, Fe - 47 100, Sr - 240, U - 4,3. Если показатели верхней континентальной коры отражают глобальный геохимический фон твердой оболочки Земли, то глинистые сланцы используются как более адекватный эталон для осадочных пород, близких по генезису к донным отложениям. Сопоставление с этими ориентирами позволяет выявить степени обогащения или обеднения элементов и тем самым оценить как естественные геохимические особенности исследуемой территории, так и возможное антропогенное влияние.

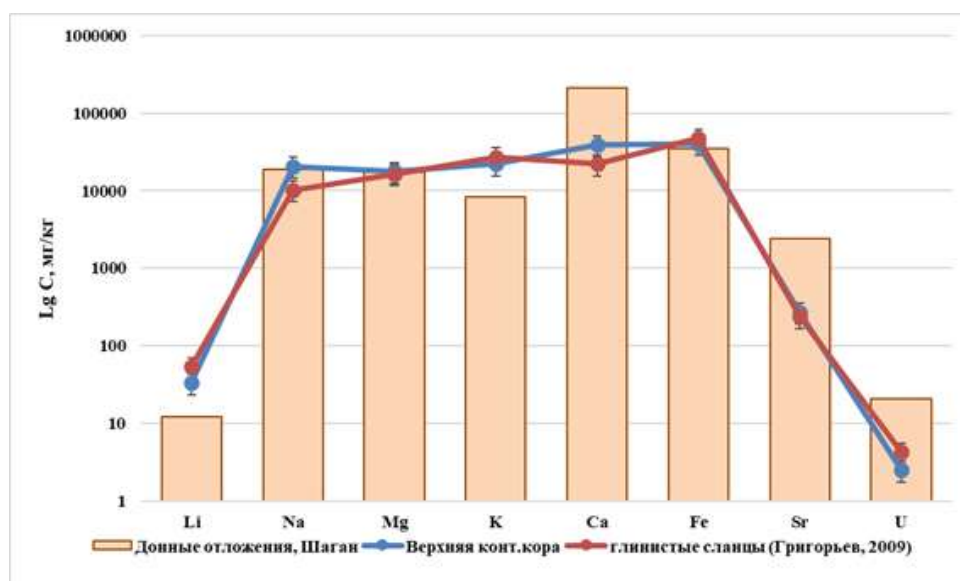


Рисунок 3. Сравнение средних концентраций химических элементов в верхней части континентальной коры, глинистых сланцах и донных отложениях р. Шаган. Примечание – составлено авторами по данным Григорьева Н.А., 2009

Анализ представленных данных указывает на различия в распределении исследуемых групп химических элементов в составе донных отложений р. Шаган. Так, при сравнении с содержанием элементов в составе верхней части континентальной коры геохимический ряд их накопления в донных отложениях выстраивается в следующей последовательности: $Sr_{8,9} > U_{8,4} > Ca_{5,4}$ (в индексе указана кратность превышения кларка). Тогда как при сопоставлении с содержанием элементов в глинистых сланцах геохимический ряд выстраивается несколько иначе – $Sr_{10} > Ca_{9,4} > U_{4,9} > Na_{1,8} > Mg_{1,1}$. Сопоставление с глинистыми сланцами имеет особое значение, поскольку именно они отражают специфику осадочных пород, наиболее близких по генезису к донным отложениям. Такой подход позволяет более корректно оценить особенности химического состава исследуемого материала и выявить возможные отклонения, связанные как с природными условиями седиментации, так и с техногенным влиянием. Таким образом такая геохимическая тенденция может свидетельствовать о наличии дополнительного источника поступления Sr, Ca и U. В отношении концентраций Li, K и Fe установлено, что содержание Fe находится на уровне его кларкового значения, тогда как концентрации Li и K не превышают соответствующих кларковых величин. Такой результат свидетельствует об отсутствии выраженного обогащения донных отложений данными элементами и указывает на их близость к фоновым геохимическим значениям.

Рассчитанные индексы геоаккумуляции показали значительную изменчивость, находясь в диапазоне от -2.76 до 2.74 (таблица 3).

Таблица 3

Геохимический индекс (*I_{geo}*), рассчитанный для образцов донных отложений

Химические элементы	Значение геохимического индекса (<i>I_{geo}</i>)	Классификация по <i>I_{geo}</i>
Li	-2.76	0
Na	0.30	1
Mg	-0.51	0
K	-2.29	0
Ca	2.65	3
Fe	-1.02	0
Sr	2.74	3
U	1.70	2

Наименьшее значение получено для Li (-2.76), что указывает на отсутствие загрязнения донных отложений р. Шаган данным элементом. Показатель индекса геоаккумуляции для K, Fe и Mg также оказался минимальным и соответствует классу 0, что отражает природный фон данных элементов в донных отложениях. Низкое значение показателя также установлено для Na (0.30), что соответствует 1 классу и характеризует степень как «от незагрязненных до умеренно загрязненных». Значения индекса *I_{geo}* для химического элемента U отнесли его к 2-му классу, соответствующему умеренно загрязненным отложениям. Значение индекса геоаккумуляции для Ca (2.65) и Fe (2.74) отнесено к 3-му классу, характеризующему состояние донных отложений как «от умеренно до сильно загрязненных».

Результаты корреляционного анализа, представленные в таблице 4, показывают, что взаимосвязи между отдельными микроэлементами в донных отложениях могут быть обусловлены их геохимической сопряженностью и отражать особенности источников и путей поступления металлов.

В донных отложениях загрязненного участка р. Шаган была выявлена сильная корреляция между содержанием Li и Na (0.78), очень сильная между концентрацией

Li и K (0.80), Na и K (0.84), а также Ca и Sr (0.96), что может подтверждать их общее происхождение от одного или нескольких источников. Анализ показал, что концентрация U в донных отложениях характеризуется очень слабыми либо отрицательными взаимосвязями с содержанием остальных изученных элементов, тогда как с Ca зафиксирована корреляция средней силы.

Таблица 4

Коэффициенты корреляции Спирмена между исследованными показателями

	Li	Na	Mg	K	Ca	Fe	Sr	U
Li	1.00							
Na	0.78	1.00						
Mg	0.49	0.53	1.00					
K	0.80	0.84	0.15	1.00				
Ca	-0.29	-0.56	0.37	-0.62	1.00			
Fe	-0.12	0.22	0.67	-0.34	0.20	1.00		
Sr	0.04	-0.13	0.75	-0.34	0.89	0.45	1.00	
U	-0.11	-0.67	-0.24	-0.51	0.46	-0.31	0.18	1.00

В системах мелководных поверхностных водотоков ключевую роль в формировании потока питательных веществ и продуктивности экосистемы играет интенсивный обмен материалом между донными отложениями и водой [21...22]. Основным природным источником поступления микроэлементов в донные отложения рек являются процессы выветривания и эрозии горных пород и почв, при этом количество химических элементов, переносимых данным путем, определяет их содержание в конкретной территории и формирует так называемый локальный геохимический фон. Оценка природного уровня содержания металлов в донных отложениях рек для определенного региона имеет важное значение, так как служит исходной величиной при определении степени загрязнения.

При выборе критериев оценки степени загрязнения были выделены условные «индикаторные» элементы (Li, Fe, Sr, U), ранее определенные в литературе как основные загрязнители водной среды р. Шаган [9, 10]. Их включение было обусловлено зафиксированными высокими концентрациями в пробах воды. В рамках настоящего исследования для установления поступления данных групп элементов, а также макрокомпонентов (Na, Mg, K, Ca) из донных отложений проведена их количественная характеристика с оценкой средних содержаний. Как показали результаты, химические элементы по величине средних концентраций формируют следующий ряд: $Ca_{208600} > Fe_{34800} > Na_{18800} > Mg_{17400} > K_{8400} > Sr_{2400} > U_{21} > Li_{12}$, что в целом отражает естественный характер распределения.

Сопоставление полученных данных со средними концентрациями элементов в верхней части континентальной коры и глинистых сланцах [15] показало наличие отклонений от фоновых значений. По кларкам концентраций установлены геохимические ряды: $Sr_{8,9} > U_{8,4} > Ca_{5,4}$ (превышение среднего содержания в верхней части континентальной коры) и $Sr_{10} > Ca_{9,4} > U_{4,9} > Na_{1,8} > Mg_{1,1}$ (превышение в глинистых сланцах). Эти результаты косвенно подтверждают поступление соответствующих элементов в водную среду р. Шаган и согласуются с гипотезами, ранее высказанными другими исследователями относительно Sr и U [10; 9]. Следует учитывать содержание отдельных макрокомпонентов (Ca, Na, Mg), так как их повышенные концентрации в донных отложениях могут способствовать росту содержания этих элементов в воде. Вместе с тем, принимая во внимание их широкое распространение в природе, нельзя однозначно утверждать, что выявленные превышения связаны именно с

антропогенным воздействием - они могут быть обусловлены и особенностями геологического строения.

В результатах другого исследования [8] было выявлено, что в донных отложениях р. Шаган основными загрязнителями являются Mn, Sr, U, As. При этом следует учитывать, что в указанной работе анализ проводился по кислоторастворимым формам элементов (экстракция в 1 н HCl), тогда как в настоящем исследовании представлены данные по валовому содержанию. Тем не менее, наблюдается совпадение результатов по содержанию Sr, U, что подтверждает их ключевую роль как основных загрязнителей донных отложений р. Шаган. Более высокие концентрации щелочноземельных элементов (Ca и Sr) могут указывать на вклад локальных геологических источников, тогда как вариации содержания U чаще связаны с техногенным воздействием.

Для оценки степени загрязнения донных отложений химическими элементами многие исследователи используют геохимические критерии относительно геохимического фона, то есть содержания элементов, присутствующих в осадках при естественных условиях (геохимический индекс и коэффициент загрязнения) [20, 23...25]. Полученные значения индекса I_{geo} для отдельных микроэлементов, аккумулярованных в донных отложениях исследуемой р. Шаган, указывают как на природные (выветривание горных пород), так и на антропогенные (поступление загрязнителей с загрязненных навалов грунта «Атомное озеро» и поступление элементов с подземными водами по тектоническим разломам) источники выявленных элементов [9].

В донных отложениях загрязненного участка р. Шаган значения индексов I_{geo} были различные и по значениям различных химических элементов относятся к категории от «незагрязненных» до «сильно загрязненных» осадков. Высокие значения индекса геоаккумуляции для Sr (2.74), Ca (2.65) и U (1.70) указывает на необходимость незамедлительных мер по снижению загрязнения и предотвращению деградации водосбора, при этом следует отметить, что умеренная степень загрязнения донных отложений отмечена по U.

В донных отложениях р. Шаган выявлены сильные положительные корреляции между содержанием Li-Na, Li-K, Na-K, а также Ca-Sr. Подобные связи отражают их схожие геохимические свойства и указывают на общий источник поступления. Щелочные элементы (Li, Na, K) характеризуются высокой подвижностью и склонны к совместной миграции в водных системах [26...27]. Корреляция Ca-Sr объясняется их геохимической близостью, поскольку Sr часто изоморфно замещает Ca в карбонатах и сульфатах, что подтверждается результатами исследований по различным речным системам [28].

В отличие от макроэлементов и Li, U демонстрирует слабые либо отрицательные взаимосвязи с большинством элементов, что указывает на иной механизм поступления. Зафиксированная корреляция средней силы с Ca может быть связана с образованием уранил-карбонатных комплексов в окислительных условиях, что отмечается в работах по гидрогеохимии U [29]. Учитывая известную техногенную природу источников U на исследуемой территории, можно предположить, что его аккумуляция в донных отложениях имеет преимущественно антропогенный характер, тогда как Na, K, Ca и Sr поступают в основном за счет природных геологических процессов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований показали, что донные отложения «старого русла» р. Шаган характеризуются загрязнением рядом химических элементов. Средние концентрации большинства из них (Na, Mg, Ca, Sr, U) превышают геохимический фон, то есть их среднее содержание в глинистых сланцах, за исключением Li, K и Fe.

Сопоставление полученных данных со средними концентрациями элементов в верхней части континентальной коры и глинистых сланцах [15] выявило отклонения от фоновых значений. По кларкам концентраций установлены геохимические ряды, отражающие превышение среднего содержания элементов в верхней части континентальной коры ($Sr_{8,9} > U_{8,4} > Ca_{5,4}$) и в глинистых сланцах ($Sr_{10} > Ca_{9,4} > U_{4,9} > Na_{1,8} > Mg_{1,1}$). Полученные результаты косвенно указывают на поступление соответствующих элементов в водную среду р. Шаган. Такой подход позволяет комплексно охарактеризовать геохимическую специфику исследуемой территории и определить вклад как природных, так и антропогенных факторов в формирование химического состава донных отложений.

Анализ степени загрязнения донных осадков с использованием геохимического индекса (I_{geo}) показал, что донные отложения р. Шаган относятся к 0 классу (незагрязненные донные отложения) по содержанию Li, Mg, K, Fe. Для Na и U рассчитанный индекс I_{geo} отнес эти осадки к 1 классу (от незагрязненных до умеренно загрязненных осадков) и 2 классу (умеренно загрязненных осадков). Тогда как для Ca и Sr I_{geo} – к 3 классу, что соответствует степени от умеренно загрязненных до сильно загрязненных осадков.

Таким образом, результаты анализа подтверждают, что часть загрязняющих элементов (Na, K, Sr, Ca) поступает в донные отложения преимущественно за счет геологических процессов, тогда как U демонстрирует иной, вероятно, антропогенный путь миграции. Это подчеркивает необходимость дифференциации геогенных и техногенных факторов при интерпретации состава донных отложений и оценке экологического состояния р. Шаган.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в этом исследовании получены авторами по проведенным полевым, камеральным испытаниям.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация - АЕТ, НЖМ; управление данными - АЕТ, ЖАБ; формальный анализ - АЕТ, ЖАБ, НЖМ; методология - АЕТ, МРА, ДКК; программное обеспечение - АЕТ; мониторинг - АЕТ, НЖМ; визуализация - АЕТ; написание первоначального проекта - АЕТ; написание обзора и редактирование - НЖМ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках проекта «Комплексное радиоэкологическое исследование бассейна р. Шаган и разработка рекомендаций по минимизации негативного влияния на окружающую среду и население» (ИРН AP22783154) при финансировании Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Aktayev M., Subbotin S., Aidarkhanov A., Aidarkhanova A. K., Timonova L. V., Larionova N. (2024). Characterization of geological and lithological features in the area proximal to tritium-contaminated groundwater at the Semipalatinsk test site. PLOS ONE, 19, e0300971. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300971>
- 2 Timonova L. V., Lyakhova O. N., Lukashenko S. N., Aidarkhanov A. O., Kabdyrakova A. M., Serzhanova Z. B. (2020). Tritium distribution in soil in the area of “Atomic” Lake near the Semipalatinsk Test Site. Eurasian Soil Science, 53(3), 355–361. <https://doi.org/10.1134/S1064229320030096>
- 3 Айдарханов А. О., Актаев М. Р., Есимбеков А. Ж., Анисимов В. С. Определение и локализация каналов поступления 3H в воды р. Шаган // Радиация и риск. – 2013, - №22(4), - С. 66-73. ISSN 0131-3878.
- 4 Комлев А. В., Зеленский К. Л., Кокежанов Б. А., Кириллов А. В. Изучение возможных путей миграции трития в бассейн р. Шаган // Вестник НЯЦ РК. – 2013, - №4, - С. 96 -101.
- 5 Айдарханов А. О., Лукашенко С. Н., Субботин С. Б., Эдомин В. И., Генова С. В., Топорова А. В., Ларионова Н. В., Пестов Е. Ю. Состояние экосистемы р. Шаган и основные механизмы ее формирования // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана / под ред.. – Вып. 2. – Семипалатинск: Дом печати, 2010. – С. 9–55. – URL: https://irse.nnc.kz/wp-content/uploads/2018/10/Vypusk_2_rus.pdf
- 6 Субботин С. Б., Лукашенко С. Н., Айдарханов А. О., Ларионова Н. В., Яковенко Ю. Ю. Радиоактивное загрязнение техногенными радионуклидами компонентов экосистемы реки Шаган // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. – 2010, – № 3 (14), – С. 106–114.
- 7 Актаев М. Р., Лукашенко С. Н., Айдарханов А. О., Ляхова О. Н. Характер загрязнения тритием вод р. Шаган в районе «Атомного» озера // Вестник НЯЦ РК. – 2017. – Т. 4, № 2. – С. 5–8.

- 8 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.
- 9 Gorlachev I., Kharkin P., Dyussembayeva M., Lukashenko S., Gluchshenko G., Matiyenko L., Zheltov D., Kitamura A., Khlebnikov N. (2020). Comparative analysis of water contamination of the Shagan River at the Semipalatinsk test site with heavy metals and artificial radionuclides. *Journal of Environmental Radioactivity*, 213, 106110. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106110>
- 10 Ташекова А. Ж., Лукашенко С. Н., Койгельдинова М. Т., Мухамедияров Н. Ж. Характеристика элементного состава воды р. Шаган // Вестник КрасГАУ. – 2016, – № 12, – С. 141–146.
- 11 Yan X., Yang W., Pu Z., Zhang Q., Chen Y., Chen J., Xiang W., Chen H., Cheng Y., Zhao Y. (2025). Responses of typical riparian vegetation to annual variation of river flow in a semi-arid climate region: Case study of China's Xiliao River. *Land*, 14(1), 198. <https://doi.org/10.3390/land14010198>
- 12 Xing J., Wang L., Zhao J., Zhai T. (2024). Hydrochemical variation characteristics and driving factors of surface water in arid areas—a case study of Beichuan River in Northwest China. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1493390. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1493390>
- 13 Al-Dabbas M., Al-Shamma'a A., Ghafel K. (2018). Evaluation of Gharraf River water for different uses, South Iraq. *Iraqi Journal of Science*, 59(3C), 1697–1709. <https://doi.org/10.24996/ij.s.2018.59.3C.15>
- 14 Xue Y., Song J., Zhang Y., Kong F., Wen M., Zhang G. (2016). Nitrate pollution and preliminary source identification of surface water in a semi-arid river basin, using isotopic and hydrochemical approaches. *Water*, 8(8), 328. <https://doi.org/10.3390/w8080328>
- 15 Григорьев Н. А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург : УрО РАН, 2009. – 383 с.
- 16 Kulbat E., Sokołowska A. (2019). Methods of assessment of metal contamination in bottom sediments (Case study: Straszyn Lake, Poland). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 77(3), 465–478. <https://doi.org/10.1007/s00244-019-00662-5>
- 17 Liu P., Zheng C., Wen M., Luo X., Wu Z., Liu Y., Chai S., Huang L. (2021). Ecological risk assessment and contamination history of heavy metals in the sediments of Chagan Lake, Northeast China. *Water*, 13(7), 894. <https://doi.org/10.3390/w13070894>
- 18 Zhao S., Li Y., Liu D., Li B., Xiao H., Cheng W., Li A., Chong J. (2016). Spatial distribution, ecological risk assessment and source identification for nutrients and heavy metals in surface sediments from Tangxun Lake, Wuhan, Central China. *Nature Environment and Pollution Technology*, 15(4), 1417–1425.
- 19 Müller G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, 2(1), 108–118.
- 20 Ostrovsky I., Tęgowski J. (2010). Hydroacoustic analysis of spatial and temporal variability of bottom sediment characteristics in Lake Kinneret in relation to water level fluctuation. *Geo-Marine Letters*, 30(3–4), 261–269. <https://doi.org/10.1007/s00367-009-0180-4>
- 21 Middelburg J. J., Levin L. A. (2009). Coastal hypoxia and sediment biogeochemistry. *Biogeosciences Discussions*, 6(3), 3655–3706. <https://doi.org/10.5194/bgd-6-3655-2009>
- 22 Sidoruk M. (2023). Pollution and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the bottom sediments: A case study of eutrophic Bukwałd Lake located in an agricultural catchment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), 2387. <https://doi.org/10.3390/ijerph20032387>
- 23 Świercz A., Tomczyk-Wydrych I., Bąk Ł. (2022). Quality of bottom sediments of Sołtmany Lake (Masurian Lake District, Poland) in the light of geochemical and ecotoxicological criteria—Case study. *Water*, 14(13), 2045. <https://doi.org/10.3390/w14132045>
- 24 Alieva E., Abdykadyrova R., Totubaeva, N. (2025). Assessment of contamination and accumulation of heavy metals in sediments of Lake Issyk-Kul. *Grassroots Journal of Natural Resources*, 8(1), 874–893. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.080137>
- 25 Sarker P., Rahaman M. S., Kabir M. M., Al Mamun A., Maruo M. (2021). Evaluation of contamination and accumulation of heavy metals in the Dhaleswari River sediments, Bangladesh. *International Journal of Environment*, 10(1), 62–75. <https://doi.org/10.3126/ije.v10i1.38399>
- 26 Liu C.-Y., Wilson D. J., Hathorne E. C., Xu A., Pogge von Strandmann P. A. E. (2023). The influence of river-derived particles on estuarine and marine elemental cycles: Evidence from lithium isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 361, 183–199. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2023.08.015>
- 27 Ma Y., Qin X., Pan T., Chen J., Jiang Z., Ding C., Zhang D., Zhang F., Feng N., Liu C., Li Q., Ren E. (2024). Sedimentary environment and source analysis of sedimentary lithium deposits in Dezong Mahai Salt Lake, Qaidam Basin. *Sustainability*, 16(23), 10561. <https://doi.org/10.3390/su162310561>
- 28 Goldhaber M., Morrison J., Holloway J., Wanty R., Helsel D., Smith D. (2009). A regional soil and sediment geochemical study in northern California. *Applied Geochemistry*, 24(8), 1482–1499. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.04.018>
- 29 Langmuir D. (1997). *Aqueous environmental geochemistry* (601 p.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

REFERENCES

- 1 Aktayev M., Subbotin S., Aidarkhanov A., Aidarkhanova A. K., Timonova L. V., Larionova N. (2024). Characterization of geological and lithological features in the area proximal to tritium-contaminated groundwater at the Semipalatinsk test site. *PLOS ONE*, 19, e0300971. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300971>
- 2 Timonova L. V., Lyakhova O. N., Lukashenko S. N., Aidarkhanov A. O., Kabdyrakova A. M., Serzhanova Z. B. (2020). Tritium distribution in soil in the area of “Atomic” Lake near the Semipalatinsk Test Site. *Eurasian Soil Science*, 53(3), 355–361. <https://doi.org/10.1134/S1064229320030096>
- 3 Aidarkhanov A. O., Aktaev M. R., Esimbekov A. Zh., Anisimov V. S. (2013). Opredelenie i lokalizatsiya kanalov postupleniya ^3H v vody r. Shagan [Determination and localization of ^3H inflow channels into the waters of the Shagan river]. *Radiatsiya i risk [Radiation and Risk]*, 22(4), 66–73. [In Russian]
- 4 Komlev A. V., Zelensky K. L., Kokezhanov B. A., Kirillov A. V. (2013). Izuchenie vozmozhnykh putei migratsii tritiya v basseyn r. Shagan [Study of possible tritium migration pathways in the Shagan River basin]. *Vestnik NYaTs RK [NNC RK Bulletin]*, 4, 96–101. <https://www.nnc.kz/media/bulletin/files/KUJvRiwBXS.pdf> [In Russian]
- 5 Aidarkhanov A. O., Lukashenko S. N., Subbotin S. B., Edomin V. I., Genova S. V., Toporova A. V., Larionova N. V., Pestov E. Yu. (2010). Sostoyaniye ekosistemy r. Shagan i osnovnye mekhanizmy yeye formirovaniya [The state of the Shagan River ecosystem and the main mechanisms of its formation]. In S. N. Lukashenko (Ed.), *Aktual'nye voprosy radioekologii Kazakhstana [Current issues of radioecology in Kazakhstan]* (Vol. 2, pp. 9–55). Dom Pechati. ISBN 978-601-7112-32-5. https://irse.nnc.kz/wp-content/uploads/2018/10/Vypusk_2_rus.pdf [In Russian]
- 6 Subbotin S. B., Lukashenko S. N., Aidarkhanov A. O., Larionova N. V., Yakovenko Y. Y. (2010). Radioaktivnoye zagryazneniye tekhnogennymi radionuklidami komponentov ekosistemy reki Shagan [Radioactive contamination of ecosystem components of the

- Shagan river with artificial radionuclides]. Problemy biogeokhimii i geokhimicheskoy ekologii [Problems of Biogeochemistry and Geochemical Ecology], 3(14), 106–114. [In Russian]
- 7 Aktaev M. R., Lukashenko S. N., Aidarkhanov A. O., Lyakhova O. N. (2017). Kharakter zagryazneniya tritiem vod r. Shagan v rayone «Atomnogo» ozera [Characteristics of tritium contamination in the Shagan river near the «Atomic» lake]. Vestnik NYaTs RK [NNC RK Bulletin], 4(2), 5–8. <https://www.nnc.kz/media/bulletin/files/t4iXY1FxQr.pdf> [In Russian]
- 8 Dyusembaeva M. T., Mukhamediyarov N. Zh., Esilkhanov G. M., Tashekova A. Zh., Aidarkhanov A. O. (2023). Ekologo-geokhimicheskie osobennosti nekotorykh vodnykh ob'ektov Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona [Ecological and geochemical features of some water bodies of the Semipalatinsk Test Site]. Kurchatov: Intellect Publishing House. 268 p. [In Russian]
- 9 Gorlachev I., Kharkin P., Dyussebayeva M., Lukashenko S., Glushchenko G., Matiyenko L., Zheltov D., Kitamura A., Khlebnikov N. (2020). Comparative analysis of water contamination of the Shagan River at the Semipalatinsk test site with heavy metals and artificial radionuclides. Journal of Environmental Radioactivity, 213, 106110. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106110>
- 10 Tashekova A. Zh., Lukashenko S. N., Koygeldinova M. T., Mukhamediyarov N. Zh. (2016). Kharakteristika elementnogo sostava vody r. Shagan [Characteristics of the elemental composition of Shagan River water]. Vestnik KrasGAU [Bulletin of KrasGAU], (12), 141–146. [In Russian]
- 11 Yan X., Yang W., Pu Z., Zhang Q., Chen Y., Chen J., Xiang W., Chen H., Cheng Y., Zhao Y. (2025). Responses of typical riparian vegetation to annual variation of river flow in a semi-arid climate region: Case study of China's Xiliao River. Land, 14(1), 198. <https://doi.org/10.3390/land14010198>
- 12 Xing J., Wang L., Zhao J., Zhai T. (2024). Hydrochemical variation characteristics and driving factors of surface water in arid areas—a case study of Beichuan River in Northwest China. Frontiers in Environmental Science, 12, 1493390. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1493390>
- 13 Al-Dabbas M., Al-Shamma'a A., Ghafel K. (2018). Evaluation of Gharraf River water for different uses, South Iraq. Iraqi Journal of Science, 59(3C), 1697–1709. <https://doi.org/10.24996/ij.s.2018.59.3C.15>
- 14 Xue Y., Song J., Zhang Y., Kong F., Wen M., Zhang G. (2016). Nitrate pollution and preliminary source identification of surface water in a semi-arid river basin, using isotopic and hydrochemical approaches. Water, 8(8), 328. <https://doi.org/10.3390/w8080328>
- 15 Grigor'ev N. A. (2009). Raspredelenie khimicheskikh elementov v verkhnei chasti kontinental'noi kory [Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust]. Ekaterinburg: UrO RAN. 383 p. [In Russian]
- 16 Kulbat E., Sokolowska A. (2019). Methods of assessment of metal contamination in bottom sediments (Case study: Straszyn Lake, Poland). Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 77(3), 465–478. <https://doi.org/10.1007/s00244-019-00662-5>
- 17 Liu P., Zheng C., Wen M., Luo X., Wu Z., Liu Y., Chai S., Huang L. (2021). Ecological risk assessment and contamination history of heavy metals in the sediments of Chagan Lake, Northeast China. Water, 13(7), 894. <https://doi.org/10.3390/w13070894>
- 18 Zhao S., Li Y., Liu D., Li B., Xiao H., Cheng W., Li A., Chong J. (2016). Spatial distribution, ecological risk assessment and source identification for nutrients and heavy metals in surface sediments from Tangxun Lake, Wuhan, Central China. Nature Environment and Pollution Technology, 15(4), 1417–1425.
- 19 Müller G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. GeoJournal, 2(1), 108–118.
- 20 Ostrovsky I., Tegowski J. (2010). Hydroacoustic analysis of spatial and temporal variability of bottom sediment characteristics in Lake Kinneret in relation to water level fluctuation. Geo-Marine Letters, 30(3–4), 261–269. <https://doi.org/10.1007/s00367-009-0180-4>
- 21 Middelburg J. J., Levin L. A. (2009). Coastal hypoxia and sediment biogeochemistry. Biogeosciences Discussions, 6(3), 3655–3706. <https://doi.org/10.5194/bgd-6-3655-2009>
- 22 Sidoruk M. (2023). Pollution and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the bottom sediments: A case study of eutrophic Bukwald Lake located in an agricultural catchment. International Journal of Environmental Research and Public Health, 20(3), 2387. <https://doi.org/10.3390/ijerph20032387>
- 23 Świercz A., Tomczyk-Wydrych I., Bąk Ł. (2022). Quality of bottom sediments of Sołtmany Lake (Masurian Lake District, Poland) in the light of geochemical and ecotoxicological criteria—Case study. Water, 14(13), 2045. <https://doi.org/10.3390/w14132045>
- 24 Alieva E., Abdykadyrova R., Totubaeva, N. (2025). Assessment of contamination and accumulation of heavy metals in sediments of Lake Issyk-Kul. Grassroots Journal of Natural Resources, 8(1), 874–893. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.080137>
- 25 Sarker P., Rahaman M. S., Kabir M. M., Al Mamun A., Maruo M. (2021). Evaluation of contamination and accumulation of heavy metals in the Dhaleswari River sediments, Bangladesh. International Journal of Environment, 10(1), 62–75. <https://doi.org/10.3126/ije.v10i1.38399>
- 26 Liu C.-Y., Wilson D. J., Hathorne E. C., Xu A., Pogge von Strandmann P. A. E. (2023). The influence of river-derived particles on estuarine and marine elemental cycles: Evidence from lithium isotopes. Geochimica et Cosmochimica Acta, 361, 183–199. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2023.08.015>
- 27 Ma Y., Qin X., Pan T., Chen J., Jiang Z., Ding C., Zhang D., Zhang F., Feng N., Liu C., Li Q., Ren E. (2024). Sedimentary environment and source analysis of sedimentary lithium deposits in Dezong Mahai Salt Lake, Qaidam Basin. Sustainability, 16(23), 10561. <https://doi.org/10.3390/su162310561>
- 28 Goldhaber M., Morrison J., Holloway J., Wanty R., Helsel D., Smith D. (2009). A regional soil and sediment geochemical study in northern California. Applied Geochemistry, 24(8), 1482–1499. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.04.018>
- 29 Langmuir D. (1997). Aqueous environmental geochemistry (601 p.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

ШАҒАН ӨЗЕНІНІҢ ЛАСТАНҒАН УЧАСКЕСІНДЕГІ ТҮП ШӨГІНДІЛЕРІНДЕГІ ХИМИЯЛЫҚ ЭЛЕМЕНТТЕР

Арай Е. Темиржанова^{1*}, Жанат А. Байгазинов², Нурлан Ж. Мухамедияров³, Медет Р. Актаев⁴, Касым К. Дускаев¹

¹ әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; temirzhanova.aray@mail.ru, kduskaev@gmail.com

² «Ядролық технологиялар паркі» АҚ, Курчатов, Қазақстан; zh.baigazinov@gmail.com

³ «Шәкәрім университеті» КеАҚ, Семей, Қазақстан, nurlan.eventumlab@gmail.com

⁴ «Baiterek Engineering» ЖШС, Астана, Қазақстан, medet_aktaev@mail.ru

*Автор корреспонденции: Арай Е. Темиржанова, temirzhanova.aray@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

өзен,
ластану,
химиялық элементтер,
түп шөгінділері,
геохимиялық индекс

Мақала жайында:
Жіберілді: 30.09.2025
Қайта қаралды: 03.10.2025
Қабылданды: 05.10.2025
Жарияланды: 08.10.2025

АБСТРАКТ

Ядролық қару сынақтарынан өткен аудандардағы табиғи су объектілерінің радиоактивті ластану мәселесі бүгінгі күнге дейін өзектілігін сақтап отыр. Осындай объектілердің бірі — Семей ядролық сынақ полигоны аумағында орналасқан Шаған өзені. Ерекше назар «ескі арнаға» аударылады, мұнда ластанған жерасты сулары ашық су ағысына шығатыны анықталған.

Зерттеудің мақсаты - Шаған өзенінің «ескі арнасындағы» түптік шөгінділерде химиялық элементтердің шоғырлану ерекшеліктерін анықтау. Ғылыми және тәжірибелік маңызы – жергілікті радиациялық ластану жағдайында химиялық элементтердің миграциясы мен аккумуляциясы туралы түсініктерді нақтылау. Алынған деректер ұзақ мерзімді техногендік әсерге ұшыраған өзендердің геохимиялық фонының өзгеру заңдылықтарын айқындап, мониторинг пен экологиялық болжау жүйелерін жетілдіруге негіз болады.

Зерттеу әдістемесі түп шөгінділері үлгілерін далалық жинау, зертханалық талдау (атомдық-абсорбциялық спектрометрия, индуктивті байланысқан плазмалы масс-спектрометрия), статистикалық өңдеу және ГИС-картографияны қамтыды. Шаған өзені түп шөгінділерінің ластану деңгейі геоаккумуляция индексі (Igeo) және элементтердің кларк мәндері бойынша бағаланды.

Нәтижелер бойынша келесі геохимиялық қатарлар анықталды: кейбір элементтердің мөлшері континенттік қыртыстың жоғарғы бөлігінің (Sr>U>Ca) және сазды сланецтердің (Sr>Ca>U>Na>Mg) орташа құрамынан артықшылығы байқалды. Igeo индексі бойынша түптік шөгінділер «ластанбағаннан» «қатты ластанғанға» дейін өзгереді. Li, Mg, K, Fe элементтерінің құрамдық мөлшеріне байланысты түп шөгінділер ластанбаған сыныпқа тиесілі (0 сынып), Na мен U мөлшері бойынша латсанбағаннан – қалыпты ластанған деңгейге жатады (1 - 2 сынып), ал Ca мен Sr мөлшері бойынша қалыпты ластанғаннан – өте қатты ластанған деңгейге жатады (3 сынып).

Зерттеудің маңыздылығы - радиоактивті ластанған өзен жүйелерінің геохимиялық ерекшеліктері туралы жаңа фактілік материал енгізу және экожүйелер мен адамдар үшін қауіп-қатерді бағалау бойынша кейінгі жұмыстарға база жасау. Алынған нәтижелердің практикалық мәні - оларды табиғатты қорғау шараларын ұйымдастыруда және ұзақ мерзімді экологиялық мониторингте қолдануға мүмкіндік беруінде.

CHEMICAL ELEMENTS IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF THE POLLUTED SECTION OF THE SHAGAN RIVER

Aray Temirzhanova¹, Janat Baigazinov², Nurlan Mukhamediyarov³, Medet Aktayev⁴, Kasym Duskaev¹

¹ Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; temirzhanova.aray@mail.ru, kduskaev@gmail.com

² JSC «Park of Nuclear Technologies», Kurchatov, Kazakhstan, zh.baigazinov@gmail.com

³ NJSC «Shakarim University», Semey, Kazakhstan, nurlan.eventumlab@gmail.com

⁴ LLC «Baiterek Engineering», Astana, Kazakhstan, medet_aktayev@mail.ru

* Corresponding author: Aray Temirzhanova, temirzhanova.aray@mail.ru

KEY WORDS

river,
pollution,
chemical elements,
bottom sediments,
geoaccumulation index

ABSTRACT

The issue of radioactive and chemical pollution of natural water bodies remains relevant in regions affected by nuclear weapons testing. One such object is the Shagan River, located within the Semipalatinsk Test Site. Of particular concern is the «old channel», where contaminated groundwater and fracture water discharge into the surface flow.

The aim of this study is to identify the patterns of chemical element accumulation in the bottom sediments of the «old channel» of the Shagan River.

About article:

Received: 30.09.2025

Revised: 03.10.2025

Accepted: 05.10.2025

Published: 08.10.2025

The scientific significance lies in clarifying migration and accumulation processes of chemical elements under conditions of localized radioactive contamination. The results provide insights into the transformation of the geochemical background in rivers exposed to long-term technogenic impact, supporting the development of monitoring and forecasting systems.

The methodology included field sampling, laboratory analyses (atomic absorption spectrometry, inductively coupled plasma mass spectrometry), statistical data processing, and GIS-based mapping. Contamination of bottom sediments was assessed using the geoaccumulation index (Igeo) and comparison with Clarke values.

The results showed geochemical series indicating elevated element concentrations in the upper continental crust ($Sr > U > Ca$) and clay shales ($Sr > Ca > U > Na > Mg$). According to Igeo, bottom sediments of the Shagan River ranged from unpolluted to heavily polluted: Li, Mg, K, and Fe corresponded to class 0, Na and U to classes 1–2 (unpolluted to moderately polluted), while Ca and Sr fell into class 3 (moderately to heavily polluted).

This study contributes new empirical data on the geochemical characteristics of radioactively contaminated river systems and establishes a basis for further research on ecological and human health risks. The findings also have practical value for environmental protection and the development of long-term monitoring programs.

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).