

Гидрохимические параметры загрязненных участков реки Шаган в пределах Семипалатинского испытательного полигона

Арай Темиржанова^{1,2}, Жанат Байгазинов^{2,3*}, Нурлан Мухамедияров^{2,3,4,5}, Медет Актаев^{2,6}, Касым Дускаев¹, Динара Тургалиева², Назира Берикбол^{2,3}, Арайлым Ануарбекова²

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; arayt1010@gmail.com, kduskaev@gmail.com

²Учреждение образования «Alikhan Bokeikhan University», Семей, Казахстан; arayt1010@gmail.com, zh.baigazinov@gmail.com, nurlan.eventumlab@gmail.com, medet_aktaev@mail.ru, turgalieva.di@mail.ru, naz.naz.nazi@mail.ru, anuarbekova98@inbox.ru

³АО «Парк ядерных технологий», Курчатов, Казахстан; zh.baigazinov@gmail.com, nurlan.eventumlab@gmail.com, naz.naz.nazi@mail.ru

⁴НАО «Университет имени Шакарима города Семей», Семей, Казахстан; nurlan.eventumlab@gmail.com,

⁵ТОО «Научно-исследовательский центр «Eventumlab», Семей, Казахстан; nurlan.eventumlab@gmail.com

⁶ТОО «Baiterek Engineering», Астана, Казахстан; medet_aktaev@mail.ru

*Корреспонденция: zh.baigazinov@gmail.com

Цитирование: Темиржанова, А., Байгазинов, Ж., Мухамедияров, Н., Актаев, М., Дускаев, К., Тургалиева, Д., Берикбол, Н., Ануарбекова, А. (2025). Гидрохимические параметры загрязненных участков реки Шаган в пределах Семипалатинского испытательного полигона. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География. Экология, 151(2), 294-307.
<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-151-2-294-307>

Академический редактор:
Ж.Г. Берденов

Поступила: 27.03.2025
Исправлена: 20.05.2025
Принята: 02.06.2025
Опубликована: 30.06.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Аннотация: В статье представлены данные о распределении основных ионов и исследуемых групп микроэлементов в образцах воды, отобранных с загрязненных участков реки Шаган, расположенных в пределах Семипалатинского испытательного полигона (СИП), где ранее отмечены повышенные концентрации трития (³H). Отмечены превышения предельно допустимых концентраций (ПДК для поверхностных вод 2 и 3 классов водопользования) по общей минерализации, показатели жесткости, сумме катионов Na⁺ + K⁺, Mg²⁺ и анионов HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻ на исследуемых участках водотока реки Шаган. Рассмотрена проблема формирования микроэлементного состава на участке прямой разгрузки загрязненных трещинных и подрусловых вод в поверхностные воды реки Шаган (участок «2-ой» км) и на условно обозначенном участке «старого» русла с водопроявлениями, выходящими из зоны навалов грунта озера «Атомное». С помощью аналитического метода атомно-абсорбционной спектроскопии исследовано общее содержание химических элементов в пробах воды. Более 99% суммы масс всех химических элементов с концентрациями выше 0,1 мкг/дм³ определяются наличием 13-ти элементов, распределенных как в основном, так и «старом» русле. Относительно средних концентраций в речных водах мира их содержание в основном русле реки Шаган распределено в следующем порядке: U > Pb > Zn > La > Sr > Mn, тогда как в «старом» русле U > Mn > Fe > Al > La > Zn > Sr > Cu > Ba. В

контексте геохимической специфики района исследования такое распределение может указывать как на различия в источниках поступления химических элементов, так и на особенности миграции и осаждения в русловых зонах.

Ключевые слова: малая река; гидрохимические параметры; загрязнение; химические элементы; пространственное распределение.

1. Введение

Река Шаган является одним из основных поверхностных водных объектов на территории СИП. Она протекает вдоль его восточной границы, имеет протяженность более 200 км и является левым притоком реки Ертис. Основным фактором формирования стока является накопление запасов влаги в виде снежного покрова в холодный период года. Речной сток остается естественным (Сагингалиев и др., 2018), играет важную роль в местной экосистеме и используется для различных хозяйственных нужд (кроме питьевых, из-за высокого солесодержания), несмотря на свои ограниченные водные ресурсы.

Одной из ключевых проблем поверхностного водотока остается радиоактивное загрязнение вод техногенным радионуклидом ^3H , превышающим установленные уровни в 10-ки раз. Так в ряде работ, посвященных изучению радиоактивного загрязнения р. Шаган, выявлены зоны с повышенной активностью ^3H , достигающей от 10 000 до 200 000 Бк/кг и более. К таким зонам относятся: участок прямой разгрузки загрязненных трещинных и подрусловых вод в поверхностные воды реки (район 2-го километра), а также участок «старого» русла с водопроявлениями, выходящими из зоны навалов грунта озера «Атомное». (Айдарханов и др., 2010; Актаев и др., 2017а; Aidarkhanov et al., 2013а; Айдарханов и др., 2013б; Айдарханов и др., 2014; Комлев и др., 2014; Субботин и др., 2010; Субботин и др., 2013; Актаев и др., 2021; Комлев и др., 2013; Мамырбаева и др., 2017; Актаев и др., 2017b; Timonova et al., 2020; Aktayev et al., 2024). Следует отметить, что также были проведены комплексные радиоэкологические исследования, включающие изучение макро- и микроэлементного состава основных компонентов экосистемы р. Шаган. Так, ранее проведенные исследования (Айдарханов и др., 2010а; Актаев и др., 2019, Ташекова и др., 2016; Gorlachev et al., 2020; Дюсембаева и др., 2023) по оценке качества воды реки выявили наличие загрязняющих химических элементов (Li, Fe, Sr, U), формирующих характерный «геохимический портрет» данной экосистемы. Однако постоянный мониторинг содержания этих элементов не осуществляется, а исследования химического загрязнения проводились лишь эпизодически в рамках научно-исследовательских проектов, без учета постановки проблем на загрязненных участках.

В связи с продолжающейся хозяйственной деятельностью на пойме р. Шаган и потенциальными экологическими рисками, обусловленными климатическими изменениями, характерными для малых рек (Платонова и др., 2018; Yan et al., 2025; Al-Dabbas et al., 2018; Xue et al., 2016; Xing et al., 2024), важно проведение новых исследований. В условиях дефицита пресной воды проблема качества этих водных объектов на аридных территориях становится особенно актуальной. Их состояние требует постоянного мониторинга, предотвращения дальнейшего засоления и загрязнения, а также разработки мер по восстановлению, чтобы минимизировать неблагоприятные последствия для окружающей среды (Янин, 2003; Xia et al., 2024; Zhou et al., 2025).

Таким образом, несмотря на значительные успехи в радиоэкологических исследованиях р. Шаган, до сих пор отсутствует комплексная оценка вклада различных геохимических процессов в накопление отдельных химических элементов в воде и донных отложениях. Особенно это касается участков прямой разгрузки загрязненных трещинных и подрусловых вод в поверхностные воды реки (участок «2» км), а также на участке «старого» русла с водопроявлениями, выходящими из зоны навалов грунта озера «Атомное». Исходя из этого,

целью данной работы является оценка текущего состояния данных участков с учетом анализа гидрохимических параметров, что позволит дать объективную характеристику современного экологического состояния водотока.

Для достижения данной цели поставлено несколько задач – проведение полевых исследований (отбор проб воды); проведение лабораторно-аналитических работ (общий химический анализ поверхностных вод, определение химических элементов в воде р. Шаган); камеральная обработка результатов (статистическая обработка массива данных, интерпретация результатов полевых и лабораторных исследований с использованием ГИС-технологий, расчет общих химических показателей, а также определение микроэлементного состава воды; проведение расчетов по оценке качества воды р. Шаган на основе выявленного содержания загрязняющих элементов на участке прямой разгрузки загрязненных трещинных и подрусловых вод в поверхностные воды реки (участок 2-го км), а также на участке «старого» русла.

2. Материалы и методы

В основу работы положены результаты гидрогеохимического опробования, выполненного в сентябре 2024 года по исследовательским участкам основного и «старого» русел р. Шаган. Координатная привязка точек отбора проб осуществлялась с использованием GPS-навигатора Garmin eTrex. Пробы воды были отобраны в пределах восточных долгот 49.575 ...49. 582 и северных широт 79. 023 ...79.050. В работе применялись полевые и лабораторные методы исследования.

Отбор проб воды

Для анализа пространственного распределения содержания химических элементов, пробы воды отбирались на установленных исследовательских участках основного русла (12 заложенных профилей), интервал между точками отбора составлял около 8-10 м, что зависело от особенностей берегового рельефа. В общей сложности было выбрано около 40 точек для забора проб. Процесс забора воды проводился по руслу реки с верхнего слоя водотока 0-10 см. Также были отобраны пробы воды со «старого» русла с мест водопроявления в количестве 7 проб (рисунок 1).

Пробоотбор воды для различных видов анализа осуществлялся в соответствии с установленными стандартами. Для анализа микрокомпонентного состава пробы объемом 50 мл предварительно фильтровали через бумажный фильтр «Синяя лента», подкисляли азотной кислотой ОСЧ (3 мл HNO_3 на 1 л) и помещали в пластиковые виалы Perkin Elmer с низкой сорбционной способностью. Для общехимического анализа (определение главных ионов $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , общей минерализации и жесткости) отбиралось отдельно 1,5 л воды, которая не подлежала консервированию, согласно требованиям СТ РК ГОСТ Р 51592-2003. Определение неустойчивых компонентов воды, включая температуру, pH, удельную электрическую проводимость, а также кислотно-щелочные и окислительно-восстановительные характеристики, проводилось непосредственно на месте отбора проб с использованием портативного мультипараметрового анализатора «Mettler Toledo».

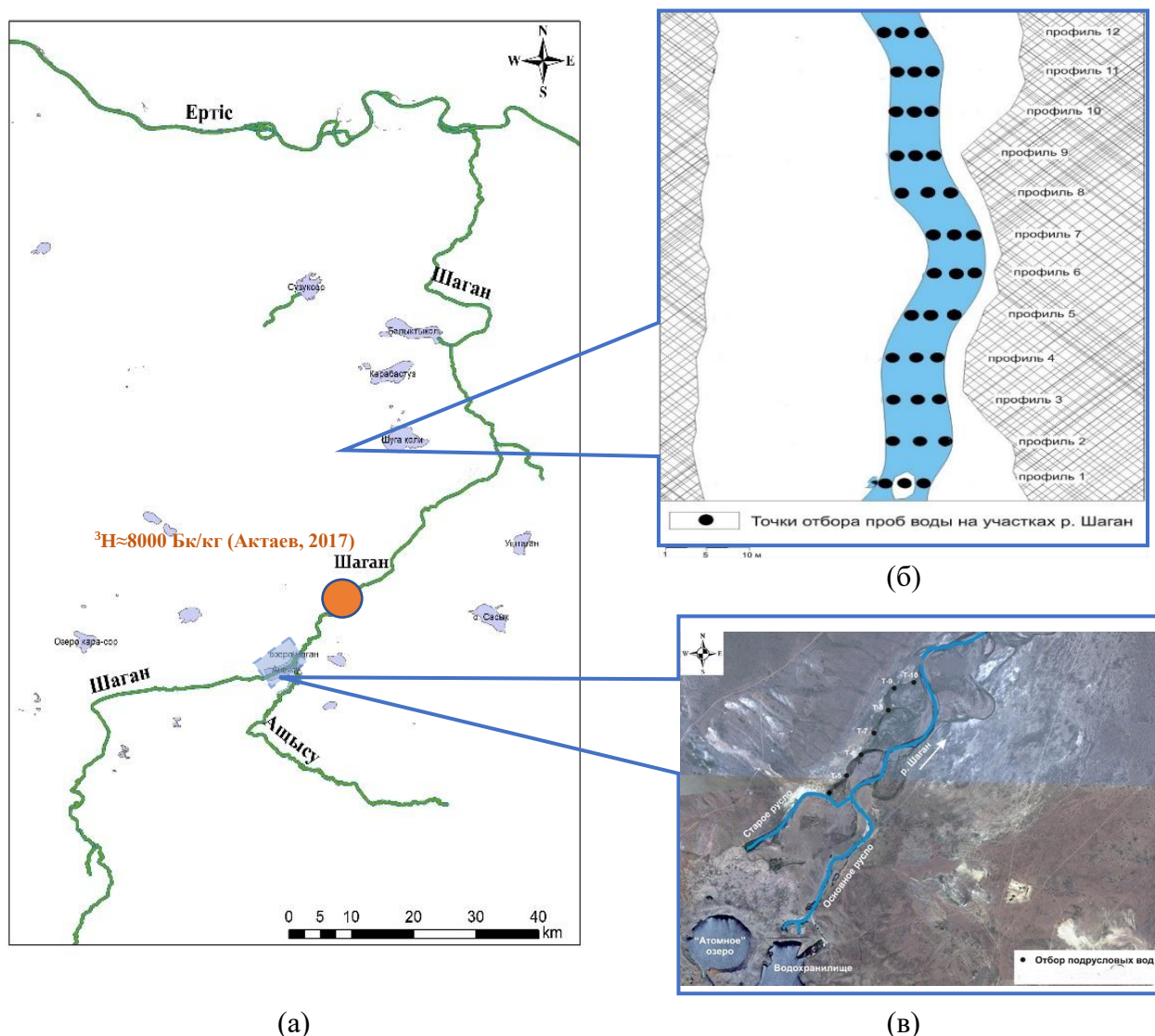


Рисунок 1. Участки исследования р. Шаган (а), точки отбора проб по основному руслу (б) и подрусловых вод «старого» русла (в) (составлено авторами)

Лабораторный анализ. Исследование макрокомпонентного состава вод (общая минерализация, содержание сульфатов, гидрокарбонатов, хлоридов, кальция, магния и натрия) выполнялось стандартным набором методов: гидрокарбонатные и карбонатные ионы – методом объемного прямого титрования; ионы кальция, магния и общей жесткости – комплексометрическим методом с индикаторами мурексидом, хромовым черным ET-00; сульфаты – весовым методом; хлориды – объемным аргентометрическим методом; суммарное содержание ионов натрия и калия рассчитано по разности между суммой анионов и катионов в ммоль/дм³ эквивалентной форме.

Содержание микроэлементов в составе воды определялось с использованием метода атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС). Был использован прибор SavantAA производства GBC Scientific Equipment, Австралия. Для построения градуировочной кривой использовались многоэлементные стандартные растворы. При отклонениях от требований выполнялось повторное построение градуировочной кривой с корректировкой параметров фона. Измерения исследуемых проб выполнялись по методике ГОСТ Р 57162-2016 (ISO 15586:2003, NEQ).

Вариационно-статистический, корреляционный анализы полученных данных проводились с использованием методов математической описательной статистики (программное обеспечение Statistica 13.0 и Microsoft Excel).

Оценка качества воды по гидрохимическим показателям (основные ионы, микроэлементы и уровень pH) проведена в соответствии с Единой системой классификации качества воды в водных объектах (Единая система..., 2016).

Для построения карт-схем использованы методы геоинформационных систем при обработке данных (Компания ESRI программа ArcGIS с дополнительными модулями Geostatistical Analyst и инструментами Xtools (ArcGIS 10.8 for Desktop)).

3. Результаты

3.1 Общехимические показатели воды

Анализ катионно-анионного состава показал, что в исследуемый период воды р. Шаган относятся к сульфатно-хлоридному натрий-кальциевому типу. Обработка и интерпретация гидрохимических данных проводилась с использованием статистических методов и боксовых диаграмм. Результаты представлены на рисунке 2. В период отбора проб значения pH поверхностных вод р. Шаган находились в диапазоне 6,80–7,97, что соответствует установленным нормативам для питьевой воды (6,5–8,5). По показателю общей жесткости (14 ммоль/л) воды реки сопоставлены с категорией «очень жестких» вод.

Что касается превышения допустимых норм по значениям содержания катионно-анионного состава, отмечаются высокие концентрации общей минерализации с превышением предельно допустимой концентрации в 1,5 раза, жесткости (в 2 раза), суммы катионов $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ (в 1,7 раз), Mg^{2+} (в 1,4 раза) и анионов HCO_3^- (в 2 раза), Cl^- (в 1,6 раз), SO_4^{2-} (в 1,3 раза), что в целом соответствует общей тенденции гидрохимического портрета р. Шаган.

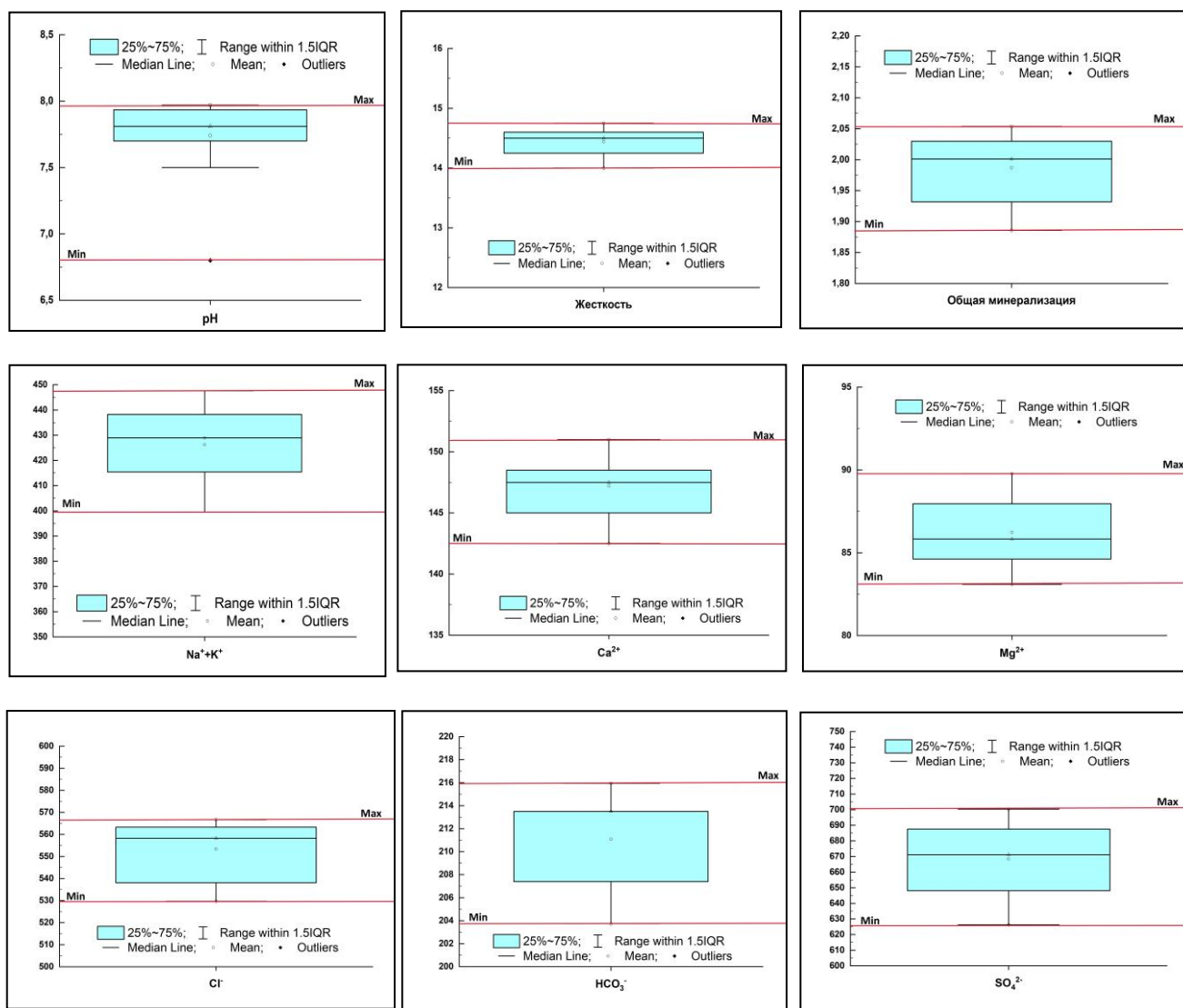


Рисунок 2. Бокс-диаграмма гидрохимических параметров проб воды р. Шаган по основному руслу (составлено авторами). Единицы измерения всех параметров - мг/л, за исключением жесткости – ммоль/л, общая минерализация – г/л

3.2 Элементный состав воды

На основании полученных данных на сегодняшний день определен элементный состав воды р. Шаган в основном русле на участке разгрузки подземных вод (участок «2-го» км), а также в старом русле (таблица 1).

Таблица 1. Содержание элементов в образцах воды р. Шаган на исследовательских участках по основному руслу (участок «2-го» км) и «старому» руслу, мкг/л

Элемент	Основное русло, n=36				Старое русло, n=7				Глобальный средний показатель (Gaillardet и др., 2011)	Предельно допустимая концентрация (Единая система..., 2016)
	Min ¹	Max ²	X±SEM ³	σ ⁴	Min	Max	X±SEM	σ		
Na	7400	8970	8500±60	380	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	-	2000

Al	24,0	42,0	33,0±0,7	4,4	63,5	3450	630±470	1200	32	500
K	47200	54800	52300±250	1500	36600	80200	55400±5100	14000	-	
Ca	9380	44400	13900±2100	10300	14900	17200	16100±370	820	-	
Mn	9,3	290	52,0±7,3	46	120	7800	1800±900	2700	34	100
Fe	13,2	120	38,0±4,0	20	200	3700	1540±470	1200	66	300
Cu	0,9	2,2	1,50±0,07	0,4	1,5	7,9	4,7±3,2	4,5	1,48	1000
Zn	0,8	37,5	12,2±1,6	9,0	0,5	15,1	6,3±2,0	6,5	0,60	5000
Sr	250	310	270±3	18	350	500	440±21	58	60	7000
Ba	22,0	28,8	24,0±0,3	1,8	24,5	58	38,5±4,8	13	23	100
La	0,4	2,2	0,92±0,10	0,5	1,0	3,2	2,3±0,5	1,1	0,120	
Pb	3,7	9,1	6,2±0,8	1,8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,079	30
U	49	130	83,0±3,0	18	114	1360	400±190	480	0,372	50 (WHO, 2017)

¹Min – минимальное содержание; ²Max – максимальное содержание; ³X±SEM – среднее и его стандартная ошибка; ⁴σ – стандартное отклонение.

Проведено сравнение содержаний элементов по основному руслу с концентрацией в «старом» русле, а также с содержанием в речных водах мира (Gailardet и др., 2011). Анализ представленных данных свидетельствует о том, что содержание большинства исследуемых химических элементов в пробах воды, отобранных из основного и «старого» русел, превышает их средние значения, характерные для речных вод мира. В частности, значения превышения концентрации элементов в основном русле составляют от 1,5 до 200 раз по сравнению с их средними значениями в водах рек мира. На основе полученных значений кларка концентрации сформирован следующий геохимический ряд: – U₂₀₀>Pb₇₈>Zn₂₀>La_{7,5}>Sr_{4,5}>Mn_{1,5}, для значений содержания элементов «старого» русла – U₁₁₀₀>Mn₅₀>Al, Fe, La₂₀>Zn₁₀>Sr₇>Cu₃>Ba_{1,7}.

Как видно из представленных данных, концентрации большинства исследуемых элементов в водах «старого» русла превышают их содержание в основном русле. В частности, для Fe, Mn и Al превышение достигает порядка десятикратных значений, для U – в 5 раз, Cu и La – в 3 и 2,5 раза соответственно, а для Sr и Ba – в 2 раза. При оценке пригодности воды санитарным нормам поверхностных вод 2 и 3 классов водопользования, которые пригодны для использования в целях хозяйственно-питьевого водоснабжения (Единая система..., 2016) для U в соответствии с рекомендациями Всемирной организации здравоохранения (WHO, 2017) по основному руслу установлены превышения значения допустимого уровня для U (в 2 раза), тогда как по «старому» руслу для Al (в 1,3 раза), Mn (в 18 раз), Fe (в 5 раз) и U (в 8 раз).

Также анализ результатов показал, что для всех профилей основного русла статистически значимые положительно высокие коэффициенты корреляции между рассчитанными и измеренными осредненными значениями концентраций установлены для Ba-Sr (r=0,81), Fe-Mn (r=0,78), K-La (r=0,71), по «старому» руслу для Al-Zn (r=0,76), Ca-Sr (r=0,89), что свидетельствует об их едином источнике поступления.

4. Обсуждение

4.1. Общехимические показатели воды

В исследованиях Айдарханова (Айдарханов и др., 2010а) за 2008–2009 гг., впервые посвященном оценке содержания макро- и микрокомпонентов в водах р. Шаган, были определены катионно-анионный состав, уровень минерализации и концентрация микроэлементов. Полученные результаты показали, что на протяжении всего обследованного участка (7 км по руслу, начиная с 1,5 км от «Атомного озера»), включая зоны разгрузки подземных вод (участки на 2-м и 5-м км), воды реки обладают крайне высоким солесодержанием. Значения общей минерализации варьировались от 10 до 30 г/л, что соответствует типу соленых вод. Кроме того, было установлено, что концентрации основных макрокомпонентов изменяются пропорционально общей минерализации. По

катионно-анионному составу воды относятся к хлоридно-сульфатному натриево-магниевого типу, при этом отмечены повышенные концентрации ионов магния.

В более позднем исследовании Ташековой совместно с другими авторами (Ташекова и др., 2016) были выявлены высокие содержания катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} и суммы $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$, а также анионов Cl^{-} и SO_4^{2-} , превышающие предельно допустимые концентрации. На основе этих данных воды р. Шаган были отнесены к категории с высоким уровнем загрязнения.

Сопоставляя представленные результаты с предыдущими данными, можно отметить снижение общей минерализации воды р. Шаган до 2,0 г/л. При этом важно учитывать, что пробы были отобраны в меженный период (осенью), тогда как вышеуказанными авторами – преимущественно в летний сезон.

Высокая жесткость и уровень минерализации указывают на усиленные процессы выщелачивания пород в зоне водосбора. Полученные данные подчеркивают необходимость дальнейшего мониторинга гидрохимического состояния реки для выявления динамики изменения качества воды и оценки степени влияния загрязняющих веществ.

Данный регион характеризуется аридным климатом с резкими перепадами температуры как между сезонами, так и в течение суток. Климатические условия, особенно среднегодовая температура, оказывают значительное влияние на химический состав вод малых рек. Высокие температуры способствуют интенсивному испарению, что приводит к капиллярному подъему более минерализованных почвенных и грунтовых вод к поверхности, повышая концентрацию солей в речной воде. Кроме того, ускоряются процессы химического выветривания горных пород, сопровождающиеся выносом растворимых солей – основного источника поступления химических элементов в поверхностные воды.

В результате этих процессов в меженный период основными ионными компонентами воды р. Шаган, как и по данным предыдущих исследований, являются сумма $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$, Mg^{2+} , HCO_3^{-} , Cl^{-} , SO_4^{2-} . Это подтверждает влияние аридного климата и сложившихся метеорологических условий на формирование химического состава речных вод. Превышение допустимых норм данных гидрохимических показателей требует постоянного мониторинга за их содержанием в составе воды исследуемых участков.

4.2 Элементный состав воды

Высокое содержание исследуемых групп элементов относительно их среднего содержания в речных водах мира может быть связано с природными процессами выщелачивания минералов, а также процессами сорбции и коагуляции, регулируемые органическим веществом и гидрохимическими условиями среды. Для уточнения механизмов их миграции и накопления необходим дополнительный анализ донных отложений и органического вещества.

Существенное различие концентрации элементов в составе образцов воды двух исследуемых русел может быть обусловлено неоднородностью их литологического строения русла и берегов. Одной из характерных особенностей «старого» русла являются естественные участки водопроявления с подпиткой грунтовыми водами, что способствует интенсивному поступлению элементов из окружающих геологических пород. Относительно высокие концентрации данных химических элементов обусловлены, прежде всего, постоянным выщелачиванием их из литологической основы, а также возможными процессами сорбции и десорбции в зоне контакта поверхностных и грунтовых вод. Дополнительное влияние могут оказывать процессы окислительно-восстановительного характера, типичные для замедленного водообмена, способствующие переходу ряда химических элементов в растворенное состояние. Также разная водопроницаемость берегов влияет на поступление подземных вод с различным химическим составом, что также определяет изменчивость содержания элементов в речной воде.

В ранее проведенных исследованиях среди основных элементов-загрязнителей вод р. Шаган были обозначены – Li, Fe, Sr, U (Ташекова и др., 2016; Gorlachev и др., 2020). Для

сопоставления данных в настоящем исследовании были обследованы содержания этих и других элементов в составе образцов воды, отобранных на участке прямой разгрузки загрязненных трещинных и подрусловых вод в поверхностные воды р. Шаган (участок «2-го» км), а также с участков водопроявления «старого» русла. Установлено превышение значений ПДК для Al, Mn, Fe и U в составе исследуемых вод, что частично соответствует ранее проведенным исследованиям (Ташекова и др., 2016; Дюсембаева и др., 2023) и отображает характерный «геохимический портрет» данной экосистемы.

Следует отметить, что в ранее проведенных исследованиях (Ташекова и др., 2016) среднее содержание U в основном русле составляло 21 мкг/л, а максимальное значение, зафиксированное на отметке 12 км от «Атомного» озера, достигало 50 мкг/л. Согласно данным другого автора (Gorlachev и др., 2020), на отметке 14 км зафиксирована идентичная максимальная концентрация (40 мкг/л), что свидетельствует о наличии постоянного источника поступления данного природного радиоактивного элемента.

В рамках настоящего исследования выявлены значительно более высокие концентрации U по сравнению с ранее опубликованными данными. Так, его среднее содержание в основном русле на участке «2-го» км составило 83 мкг/л, а в «старом» русле – 400 мкг/л. Эти участки характеризуются повышенной концентрацией U, что делает их объектами особого научного интереса. Данный природный радиоактивный элемент относится к 1-му классу опасности, поэтому мониторинг его содержания в данных районах должен носить систематический характер наряду с контролем уровня радиоактивного ^3H .

5. Заключение

Анализ результатов данного исследования показывает снижение общей минерализации воды р. Шаган до 2,0 г/л, что в первую очередь обуславливается сезоном отбора проб. По ионному составу воды р. Шаган соотнесены к сульфатно-хлоридному натрий-кальциевому типу вод в исследуемый период. По показателю общей жесткости (14 ммоль/л) воды реки сопоставлены с категорией «очень жестких» вод. Высокая жесткость и уровень минерализации указывают на усиленные процессы выщелачивания пород в зоне водосбора.

Было выявлено, что содержание большинства исследуемых химических элементов в пробах воды, отобранных из основного и «старого» русел, превышает их средние значения, характерные для речных вод мира. В частности, значения превышения концентрации элементов в основном русле составляют от 1,5 до 200 раз по сравнению с их средними значениями в водах рек мира. На основе полученных значений кларка концентрации сформирован следующий геохимический ряд: – $\text{U}_{200} > \text{Pb}_{78} > \text{Zn}_{20} > \text{La}_{7,5} > \text{Sr}_{4,5} > \text{Mn}_{1,5}$, для значений содержания элементов «старого» русла – $\text{U}_{1100} > \text{Mn}_{50} > \text{Al}, \text{Fe}, \text{La}_{20} > \text{Zn}_{10} > \text{Sr} > \text{Cu}_3 > \text{Ba}_{1,7}$.

Установлено, что концентрации большинства исследуемых элементов в водах «старого» русла превышают их содержание в основном русле. В частности, для Fe, Mn и Al превышение достигает порядка десятикратных значений, для U – в 5 раз, Cu и La – в 3 и 2,5 раза соответственно, а для Sr и Ba – в 2 раза.

Выявлено высокое содержание U с превышением допустимого уровня (50 мкг/л) в 2 раза по основному руслу, а также Al, Mn, Fe и U по «старому» руслу с превышением допустимого уровня в 1,3; 18; 5,0 и 8 раз соответственно.

Установлены высокие коэффициенты корреляции по основному руслу для Ba-Sr, Fe-Mn, K-La, по «старому» руслу для Al-Zn, Ca-Sr.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация и определение целей и задач исследования выполнены А.Т., Ж.Б. и К.Д.; отбор проб окружающей среды (вода) – Н.М. и М.А.; пробоподготовка и анализ

образцов воды в рамках общего химического исследования - Д.Т., Н.Б. и А.А.; лабораторный анализ образцов воды - Н.М.; камеральная обработка данных и статистическая интерпретация результатов - А.Т.; подготовка оригинального черновика статьи - А.Т.; рецензирование и редактирование - Ж.Б. и Н.М. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторе

Темиржанова Арай Ермаковна – докторант, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, проспект аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан, 050040; email: arayt1010@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2820-2731>

Байгазинов Жанат Абылканович - председатель правления АО «Парк ядерных технологий», ул. Курчатова, 18/1 г.Курчатова, область Абай, Казахстан, 071410; email: zh.baigazinov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0348-8473>

Мухамедияров Нурлан Жумагазыевич – докторант, НАО «Университет имени Шакарима города Семей», ул. Глинки, 20А, г. Семей, область Абай, Казахстан, 071410; email: nurlan.eventumlab@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5073-5978>

Актаев Медет Рыскалиевич – PhD, главный инженер, ТОО «Baiterek Engineering», проспект Туран, 55/11, г. Астана, Казахстан, 010000; e-mail: medet_aktaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0651-630X>

Дускаев Касым Коянбаевич – профессор кафедры метеорологии и гидрологии факультета географии и природопользования, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, проспект аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан, 050040; email: kduskaev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2489-1998>

Турғалиева Динара Турғалиқызы – научный сотрудник, преподаватель, Учреждение образования «Alikhan Bokeikhan University», ул. Мангилик Ел, 11, г. Семей, область Абай, Казахстан, 071400; turgalieva.di@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3122-6021>

Берикбол Назира Нурлықызы – научный сотрудник, НАО «Университет имени Шакарима города Семей», ул. Глинки, 20А, г. Семей, область Абай, Казахстан, 071410; email: naz.naz.nazi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4472-082X>

Ануарбекова Арайлым Нурлыбекқызы – научный сотрудник, преподаватель, Учреждение образования «Alikhan Bokeikhan University», ул. Мангилик Ел, 11, г. Семей, область Абай, Казахстан, 071400; anuarbekova98@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4455-7332>

9. 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.

10. Благодарности: отсутствуют.

11. Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12. Список литературы

1. 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). Sostoyanie 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 (Eds.), *Aktual'nye voprosy radioekologii Kazakhstana [Current issues of radioecology in Kazakhstan]* 2, 9–55. Dom Pechati. ISBN 978-601-7112-32-5. https://irse.nnc.kz/wp-content/uploads/2018/10/Vypusk_2_rus.pdf

2. Aidarkhanov, A.O., Lukashenko, S.N., Lyakhova, O.N., Subbotin, S.B., Yakovenko, Yu.Yu., Genova, S.V., Aidarkhanova, A.K. (2013a). Mechanisms for surface contamination of soils and bottom sediments in the Shagan River zone within former Semipalatinsk nuclear test site. *Journal of Environmental Radioactivity* 124, 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.05.006>
3. Aidarkhanov, A.O., Aktaev, M.R., Esimbekov, A.Zh., Anisimov, V.S. (2013b). Opređenje 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.
4. Aidarkhanov, A.O., Lukashenko, S.N., Aidarkhanova, A.K., Anisimov, V.S. (2014). Radioaktivnoe zagryaznenie vod reki Shagan (po rezul'tatam 2011-go goda) [Radioactive contamination of the Shagan river water (based on 2011 results)]. *Radiatsiya i risk [Radiation and Risk]* 23(4), 35–42.
5. Aktaev, M.R., Lukashenko, S.N., Lyakhova, O.N., Aidarkhanov, A.O. (2017a). Vyyavlenie mekhanizmov i putei postupleniya tekhnogennykh radionuklidov v vody r. Shagan na territorii Semipalatinskogo ispytatelnogo poligona [Identification of mechanisms and pathways of anthropogenic radionuclides entering the waters of the Shagan river in the Semipalatinsk Test Site area] *Gidrologicheskiye, gidrofizicheskiye, ekologicheskiye i biogeokhimicheskiye protsessy v vodnykh ob'yektakh i na vodosborakh Sibiri i ikh matematicheskoye modelirovaniye* [Hydrological, hydrophysical, ecological and biogeochemical processes in water bodies and watersheds of Siberia and their mathematical modeling]. In *III Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem Vodnye i ekologicheskie problemy Sibiri i Tsentral'noy Azii [3rd All-Russian Scientific Conference with International Participation Water and Ecological Problems of Siberia and Central Asia]* 2, 3-7. August 28-September 1, Barnaul, Russia, http://www.eecca-water.net/file/2017_ivep_tom_2.pdf
6. Aktaev, M.R., Lukashenko, S.N., Aidarkhanov, A.O., Lyakhova, O.N. (2017b). 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/t4iXY1FxFr.pdf>
7. Aktaev, M.R., Lukashenko, S.N., Aidarkhanov, A.O., Lyakhova, O.N., Toktaganov, T.Sh., Tokarev, I.V. (2019). Raspredelenie mikro- i makrokomponentov i iskusstvennykh radionuklidov v vodoeme «Atomnoe» ozero [Distribution of micro- and macro-components and artificial radionuclides in the «Atomic» lake reservoir]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya [Radiation Biology. Radioecology]* 59(3), 311–320. <https://doi.org/10.1134/S0869803119030044>
8. Aktaev, M.R., Aidarkhanov, A.O., Aidarkhanova, A.K., Pronin, S.S., Iskenov, A.O. (2021). Monitoring tritievogo zagryazneniya vod r. Shagan [Monitoring of tritium pollution of the Shagan river waters]. *Vestnik NYaTs RK [NNC RK Bulletin]* 2, 25–29. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-2-25-29>
9. 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>
10. 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>
11. Dusembaeva, M.T., Mukhamediyarov, N.Zh., Esilkanov, G.M., Tashekova, A.Zh., Aidarkhanov, A.O. (2023). Ekologo-geokhimicheskiye osobennosti nekotorykh vodnykh ob'yektov Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona: monografiya [Ecological and

- geochemical features of some water bodies of the Semipalatinsk Test Site: Monograph]. Intellect Publishing House, Kurchatov. ISBN 978-601-08-3227-5.
12. Gaillardet, J., Viers, J., Dupré, B. (2011). Trace elements in river waters. In H.D. Holland, K.K. Turekian (Eds.). *Geochemistry of earth surface systems. From the treatise on geochemistry* 1st ed., 294–335. ISBN: 978-0-08-096706-6
 13. Gorlachev, I., Kharkin, P., Dyussebayeva, 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>
 14. GOST R 57162-2016 (ISO 15586:2003, NEQ) Voda. Opreddeniye sodержaniya elementov metodom atomno-absorbtsionnoy spektrometrii s elektrotermicheskoy atomizatsiyey [ISO 15586:2003, NEQ Water. Determination of elements content by graphite furnace atomic absorption spectrometry]. (2016). Astana. https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=37161332&pos=4;-108#pos=4;-108
 15. 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>
 16. Komlev, A.V., Romanov, A.M., Melnichuk, M.A. (2014). Rezultaty statisticheskoy obrabotki dannykh po khimicheskomu sostavu prirodnnykh vod na territorii byvshego SIP [Results of statistical processing of data on the chemical composition of natural waters in the former Semipalatinsk Test Site]. *Vestnik NYaTs RK [NNC RK Bulletin]* 4(60), 77–85. <https://www.nnc.kz/media/bulletin/files/1SS8AoE1wk.pdf>
 17. Lukashenko, S.N. (2005). Obespecheniye radiatsionnoy bezopasnosti byvshego Semipalatinskogo ispytatelnogo poligona [Ensuring radiation safety of the former Semipalatinsk test site]. Report on the Republican budget program 011. Institute of Nuclear Physics NNC RK.
 18. Mamyrbaeva, A.S., Aidarkhanova, A.K., Aktaev, M.R., Lukashenko, S.N. (2017). Otsenka radionuklidnogo zagryazneniya vodnykh ob'ektov na territorii byvshego Semipalatinskogo ispytatelnogo poligona [Assessment of radionuclide contamination of water bodies in the former Semipalatinsk Test Site] *Yadernyy potentsial Respubliki Kazakhstan: Sbornik dokladov [Nuclear Potential of the Republic of Kazakhstan: Proceedings]*. In Assotsiatsiya «Yadernoe obshchestvo Kazakhstana», Astana, Kazakhstan [Association «Nuclear Society of Kazakhstan»] 13, 64–69). Astana, Kazakhstan. ISBN 9965-32-597-9 0
 19. Platonova, T.P., Pakusina, A.P., Neprokina, K.S., Panova, L.P. (2018). Ekologo-khimicheskaya kharakteristika malyykh rek goroda Blagoveshchenska [Ecological and chemical characteristics of small rivers of the city of Blagoveshchensk]. *Ekologiya [Ecology]* 2, 21–27. <https://doi.org/10.24411/1816-1863-2018-12021>
 20. Sagyingaliyev, C.B., Kuzevanov, K.I. (2018). Gidrogeologicheskiye usloviya doliny r. Shagan v svyazi s dorabotkoy ugol'nogo mestorozhdeniya Karazhyra na territorii byvshego Semipalatinskogo poligona [Hydrogeological conditions of the Shagan River valley in connection with the development of the Karazhyra coal deposit in the former Semipalatinsk Test Site]. In *Trudy XXII Mezhdunarodnogo simpoziuma Problemy geologii i osvoyeniya nedr [Problems of Geology and Subsoil Development: Proceedings of the XXII International Symposium]* 2, 523-525, April 2-7. Tomsk, Russia. https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/50649/1/conference_tpu-2018-C11_V1_p523-525.pdf
 21. Subbotin, S.B., Lukashenko, S.N., Aidarkhanov, A.O., Larionova, N.V., Yakovenko, Y.Y. (2010). Radioaktivnoe 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.
22. Subbotin, S.B., Romanenko, V.V., Novikova, E.A., Bakhtin, L.V. (2013). Issledovanie putei i mekhanizmov zagryazneniya tekhnogennymi radionuklidami vod reki Shagan (po rezul'tatam 2011–2012 gg.) [Investigation of pathways and mechanisms of anthropogenic radionuclide contamination of the Shagan river waters (based on 2011–2012 results)]. *Vestnik NYaTs RK* [NNC RK Bulletin] 4, 81–89.
23. 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.
24. 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>
25. World Health Organization. (2017). Guidelines for drinking-water quality, 4th ed. WHO. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
26. Xia, H., Su, Y., Yang, L., Liu, W., Ma, J. (2024). Effects of climate change and human activities on streamflow in arid alpine water source regions: A case study of the Shiyang River, China. *Land* 13(11), 1961. <https://doi.org/10.3390/land13111961>
27. 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. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1493390>
28. 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>
29. 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>
30. Yanin, E.P. (2003). Tyazhelye metally v maloy reke v zone vliyaniya promyshlennogo goroda [Heavy metals in a small river in the industrial city influence zone]. IMGRE Publishing House, Moscow.
31. Yedinaya sistema klassifikatsii kachestva vody v vodnykh ob'yektakh [Unified system of water quality classification in water bodies]. (2016). <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1600014513>
32. Zhou, D., Zheng, C., Jia, L., Menenti, M. (2025). Partitioning green and blue evapotranspiration by improving Budyko equation using remote sensing observations in an arid/semi-arid inland river basin in China. *Remote Sensing* 17(4), 612. <https://doi.org/10.3390/rs17040612>

Семей полигонындағы Шаған өзенінің ластанған учаскелерінің гидрохимиялық көрсеткіштері

Арай Темиржанова, Жанат Байгазинов, Нурлан Мухамедияров, Медет Актаев, Касым Дускаев, Динара Тұрғалиева, Нәзира Берікбол, Арайлым Ануарбекова

Аңдатпа. Мақалада Семей сынақ полигонының (ССП) шегінде орналасқан, бұрын тритийдің (^3H) жоғары шоғырлануы белгіленген Шаған өзенінің ластанған учаскелерінен алынған су сынамаларында негізгі иондар мен зерттелетін химиялық микроэлементтердің таралуы туралы деректер ұсынылған. Зерттелетін учаскелерде $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ жиынтық, Mg^{2+} катиондарының, HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} аниондарының, жалпы минералданудың, қаттылық көрсеткіштерінің шекті рұқсат етілген шоғырланудан (ШРК) жер үсті суларының су

пайдаланудың 2 және 3 сыныптарына бекітілген ШРК артуы байқалды. Шаған өзенінің жер үсті суларына («2-ші» км учаскесі) және «Атом» көлінің топырақ үйінділер аймағынан шығатын су көріністері бар шартты түрде белгіленген «ескі» арна аймағында ластанған жарықтар мен арна асты суларының тікелей ағу аймағында микроэлемент құрамының қалыптасу мәселесі қарастырылды. Аналитикалық атомдық-абсорбциялық спектрометрия әдісін қолдана отырып, су үлгілеріндегі химиялық элементтердің жалпы мөлшерлік құрамы зерттелді. Концентрациясы $0,1 \text{ мкг/дм}^3$ -ден жоғары барлық химиялық элементтер массалары қосындысының 99%-дан астамы Шаған өзенінің зерттелетін негізгі арнасы мен шартты түрде белгіленген «ескі» арнасында таралған 13 элементтің болуымен анықталады. Дүние жүзіндегі өзен суларындағы орташа концентрацияларға қатысты олардың Шаған өзенінің негізгі арнасындағы мөлшері келесі ретпен бөлінеді: $\text{U} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{La} > \text{Sr} > \text{Mn}$, ал «ескі» арнадағы су сынамаларында $\text{U} > \text{Mn} > \text{Fe} > \text{Al} > \text{La} > \text{Zn} > \text{Sr} > \text{Cu} > \text{Ba}$ геохимиялық рет белгіленген. Зерттелетін аумақтың геохимиялық ерекшелігі контекстінде мұндай таралу элементтермен қамтамасыз ету көздеріндегі айырмашылықтарды да, арна аймақтарындағы сол химиялық элементтер мөлшерінің миграция мен шөгу ерекшеліктерін де көрсетуі мүмкін.

Түйін сөздер: шағын өзен; гидрохимиялық көрсеткіштер; ластану; химиялық элементтер; кеңістікте таралу

Hydrochemical parameters of contaminated sections of the Shagan River within the Semipalatinsk test site

Aray Temirzhanova, Janat Baigazinov, Nurlan Mukhamediyarov, Medet Aktaev, Kassym Duskeyev, Dinara Turgaliyeva, Nazira Berikbol, Araylym Anuarbekova

Abstract: The article presents data on major ions and trace elements in waters of contaminated Shagan River areas at the Semipalatinsk Test Site, previously noted for elevated ^3H levels. Exceedances of maximum permissible concentrations for surface waters of classes 2 and 3 in terms of total mineralization, hardness, Na^+K^+ , Mg^{2+} cations, HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} anions were recorded at the investigated sites. The study addresses microelement composition formation at two key points: direct discharge zones of contaminated fracture and under-channel waters into the river (site "2nd km"), the "old" channel, influenced by seepage from soil piles near the "Atomic" lake. Elemental content was analyzed via atomic absorption spectrometry. Over 99% of the total mass of elements ($>0.1 \text{ } \mu\text{g/dm}^3$) is accounted for by 13 elements present in both the main and "old" channels. Relative to global river water averages, the elemental composition in the main channel follows: $\text{U} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{La} > \text{Sr} > \text{Mn}$; in the "old" channel: $\text{U} > \text{Mn} > \text{Fe} > \text{Al} > \text{La} > \text{Zn} > \text{Sr} > \text{Cu} > \text{Ba}$. In the context of the area's geochemical specificity, these distributions reflect differences in element input sources and migration or deposition features in distinct channel zones.

Keywords: small river; hydrochemical parameters; pollution; chemical elements; spatial distribution