








Научная статья

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА И РАСХОДА ВОДЫ Р. ШАГАН НА УЧАСТКАХ ТРИТИЕВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Арай Е. Темиржанова¹ , Медет Р. Актаев^{2,3*} , Жанат А. Байгазинов² , Нурлан Ж. Мухамедияров^{2,4} , Айнур Ж. Смагулова⁵, Нариман А. Баубек³, Ляйля Х. Акбаева⁶, Javier Rodrigo-Illari (Хавьер Родриго-Иларий)⁷, Касым К. Дускаев¹ 

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

²АО «Парк ядерных технологий», Курчатов, Казахстан; medet_aktaev@mail.ru (МРА), zh.baigazinov@gmail.com (ЖАБ), nurlan.eventumlab@gmail.com (НЖМ)

³ТОО «Baiterek Engineering», Астана, Казахстан; medet_aktaev@mail.ru (МРА), narimanbaubek1982@gmail.com (НАБ)

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

⁵Комитет науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, Астана, Казахстан; ainura.sed@gmail.com (АЖС)

⁶Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; akbaeva659@mail.ru (ЛХА)

⁷Universitat Politècnica de València (Политехнический университет Валенсии), Валенсия, Испания; jrodrigoillarri@gmail.com (ХР-И)

*Автор корреспонденции: Медет Р. Актаев, medet_aktaev@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

взаимодействие
подземных и
поверхностных вод,
гидрогеология,
радиоэкология,
зоны разгрузки
подземных вод

АБСТРАКТ

Актуальность исследований состояния водных экосистем в зонах ядерных испытаний определяется длительным сохранением последствий радиоактивного загрязнения в природных средах. В районах, подвергавшихся воздействию ядерных взрывов, проблема радиоактивного загрязнения поверхностных и подземных вод остается одной из ключевых экологических задач. Одним из таких объектов является река Шаган, расположенная на территории Семипалатинского испытательного полигона. Особое внимание уделяется участкам русла реки, где наблюдается разгрузка загрязненных подземных и трещинных вод в поверхностный водоток, что способствует дальнейшему распространению радионуклидов в водной системе.

В работе представлено комплексное исследование температурного режима и расхода воды реки Шаган в пределах зоны влияния испытательной площадки «Балапан» с целью выявления участков разгрузки подземных вод, содержащих тритий (ЗН), и анализа их пространственно-временной изменчивости. В отличие от предыдущих радиоэкологических исследований реки Шаган, ориентированных преимущественно на оценку загрязнения, в данном исследовании основной акцент сделан на взаимодействии подземных и поверхностных вод и его роли в формировании гидрологического режима и переносе радиоактивных компонентов.

Термометрические измерения, выполненные с шагом 50 м вдоль русла на протяжении 5,4 км, позволили выявить зоны аномально низких температур (8,5...10 °С), соответствующие участкам разгрузки загрязненных подземных вод. Гидрометрические измерения показали, что расход воды изменяется от 0,01 до 0,21 м³/с, с выраженными потерями стока на фильтрацию. Максимальная удельная активность ЗН фиксируется у дна водотока вблизи участков 2650...2800 м и 4950...5350 м от озера «Атомное» вниз по течению, что подтверждает связь между температурными аномалиями и поступлением подземных вод.

1. ВВЕДЕНИЕ

Река Шаган (левобережный приток р. Ертис) относится к категории поверхностных водотоков с выраженной сезонной изменчивостью. В горной части бассейна река характеризуется бурным течением и устойчивым поверхностным стоком. На равнинных участках русло частично пересыхает, распадаясь на отдельные плесы, гидравлически связанные между собой подрусловым потоком. Из-за сравнительно небольших размеров бассейна и периодического пересыхания русла на отдельных участках регулярные гидрометрические измерения в последние десятилетия не проводятся и водоток исключен из перечня гидрологических постов, охватываемых сетью наблюдений РГП «Казгидромет». Это создает определенный пробел в системе гидрологического мониторинга бассейна трансграничной реки Ертис, поскольку отсутствие наблюдений на данном участке не позволяет в полной мере оценивать особенности водного режима и динамику стока одной из ключевых малых рек региона. Однако малые реки, подобные Шагану, играют значительную роль в формировании суммарного стока, в поддержании локальных экосистем и в общем водном обмене региона, что делает их системное изучение особенно актуальным [1, 5].

В советский период и в первые годы независимости Республики Казахстан с 1951 по 1993 годы на реке Шаган проводились регулярные суточные и сезонные гидрологические наблюдения. Гидрологический пост, расположенный в селе Бестамак, относился к постам I разряда. Согласно архивным данным, площадь водосборного бассейна реки Шаган в разные годы варьировала от 1890 до 2900 км². В большинстве случаев отсутствуют сведения о расчетах по среднему годовому стоку, поскольку на равнинных участках в зимний и летний периоды наблюдалось частичное замерзание и пересыхание русла, что, в свою очередь, затрудняло проведение статистической обработки гидрологических данных [6, 11].

Особый научный интерес к бассейну реки Шаган в последние годы связан с проблемой радиоактивного загрязнения, обусловленного техногенным воздействием и историческим влиянием Семипалатинского испытательного полигона. Водный бассейн реки Шаган представляет собой один из ключевых элементов гидрогеологической системы испытательной площадки «Балапан» бывшего Семипалатинского испытательного полигона [12]. В пределах бассейна р. Шаган отмечается устойчивое присутствие ЗН, что придает особую радиоэкологическую значимость данному водному объекту [13, 14]. Наиболее высокие концентрации ЗН зафиксированы на участке примерно в 5 км ниже по течению от «Атомного» озера, тогда как минимальные значения наблюдаются в устьевой зоне, в районе впадения реки в Ертис [15, 16]. Основным источником поступления ЗН в р. Шаган являются подземные воды, разгружающиеся из зоны подземных ядерных взрывов испытательной площадки «Балапан» и из озера «Атомное» [17, 18]. Водные потоки мигрируют по проницаемым песчано-гравийным отложениям и формируют локальные аномалии в составе и температуре вод р. Шаган [19].

Ранее проведенные исследования подтвердили широкое распространение трития в подрусловых и поверхностных водах реки. Концентрация трития изменялась от $4 \cdot 10^3$ до $3,5 \cdot 10^5$ Бк/кг [20], однако пространственная структура загрязнения оказалась крайне неравномерной. При этом четкой корреляции между содержанием ЗН в поверхностных и подрусловых водах выявлено не было, что указывает на сложный характер разгрузки подземных вод и локальность фильтрационных зон [21].

Несмотря на значительное число исследований, посвященных радиоэкологическому состоянию реки Шаган, гидрогеологические механизмы формирования и распространения радиоактивного загрязнения остаются изученными недостаточно, особенно в пределах левобережного притока. Для данного водотока отсутствуют актуальные данные по основным гидрологическим параметрам, включая расход воды и температурный режим, а систематический гидрологический мониторинг не осуществляется в настоящее время. Эти пробелы существенно ограничивают

По статье:
Получено: 15.12.2025
Пересмотрено: 30.03.2026
Принято: 06.04.2026
Опубликовано: 01.07.2026

Для цитирования:

Темиржанова А.,
Актаев М., Байгазинов Ж.,
Мухамедияров Н.,
Смагулова А., Баубек Н.,
Акбаева Л., Хавьер
Родриго-Иларий, Дускаев
К. Исследование
температурного режима и
расхода воды р. Шаган на
участках тритиевого
загрязнения//
Гидрометеорология и
экология, 122 (2), 2026, 8-
22.

возможность количественной оценки вклада подземных вод в формирование стока и переноса ЗН по русловой сети.

В условиях ограниченности прямых гидрологических наблюдений применение тепловых методов рассматривается как обоснованный и информативный подход к изучению взаимодействия подземных и поверхностных вод. Температурное профилирование потока позволяет использовать температурные аномалии в русле в качестве прокси-показателя разгрузки подземных вод, поскольку подземные воды характеризуются относительно стабильным температурным режимом по сравнению с поверхностными водами [22, 24]. Таким образом, выявление пространственно-временной изменчивости температурных характеристик создает основу для идентификации зон поступления подземных вод, потенциально являющихся источниками ЗН.

В связи с этим целью данного исследования является определение расхода воды и температурных характеристик потока исследуемых зон, позволяющих идентифицировать участки разгрузки подземных вод и оценить их влияние на распределение ЗН в пределах русловой сети вниз по течению. Задачи исследования включали: полевые наблюдения, в том числе измерение расхода воды и температурных характеристик потока на ключевых участках русла реки; определение зон разгрузки подземных вод на основании анализа пространственного распределения температурных аномалий и показателей расхода воды; оценка влияния разгрузки подземных вод на формирование и распространение тритиевого загрязнения вниз по течению водотока; разработать рекомендаций по восстановлению наблюдательной сети и совершенствованию системы гидрологического мониторинга с учетом изотопных и дистанционных методов. Полученные результаты формируют основу для последующего восстановления и развития систематического гидрологического мониторинга левобережного притока, что является необходимым условием для более точной оценки масштабов и механизмов распространения радиоактивного загрязнения.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб.

Измерения проводились на участках от выхода реки из озера «Атомное» до впадения в р. Ертис, а также в зоне слияния с рекой Ащису – основным притоком р. Шаган, формирующим внешний водоем.

Расход воды определялся методом прямого сечения по двум створам (верхнему и нижнему). Площадь живого сечения вычислялась по данным промеров глубин, скорость прибором Flowatch, который был предварительно откалиброван в лабораторных условиях с использованием стандартного струйного канала. Погрешность измерений скорости потока составила $\pm 5\%$. Для характеристики гидродинамических условий по всему руслу измерения скорости течения и расхода воды выполнены на 17 гидрометрических створах от 0,5 до 110 км от выхода из озера «Атомное» (рисунок 1), при этом - детальные термометрические измерения проводились на участке до 5,4 км, где ранее были зафиксированы повышенные концентрации исследуемого радиоактивного элемента и предполагалось влияние разгрузки подземных вод. Ниже по течению повышенные концентрации данного элемента не выявлялись, в связи с чем детальные температурные измерения на этих участках не проводились.

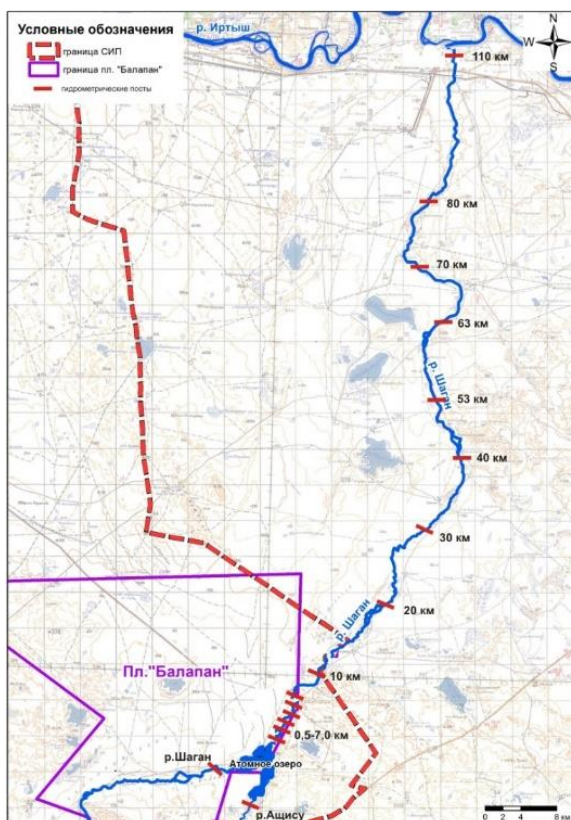


Рисунок 1. Расположение гидрометрических створов р. Шаган вниз по течению
Примечание – составлено авторами

Термометрические наблюдения проводились летом 2025 г. на участке 0,5...5,4 км (точка выхода из «Атомного» озера и внешнего водохранилища) вниз по течению с шагом 50 м вдоль русла р. Шаган с целью определения пространственного распределения температуры воды и выявления зон разгрузки подземных вод, содержащих ЗН. Летняя обезвоженность аллювиальных и аллювиально-пролювиальных отложений изучаемого региона приводит к снижению активных потоков в толще пород, что ослабляет локальные тепловые изменения [25]. В результате температура подземных вод в летний период становится относительно однородной вдоль профиля, за исключением локальных зон разгрузки, где подпитка активными потоками сохраняется. Для выявления таких зон при разведочных измерениях температурный шаг 50 м обеспечивает достаточное пространственное разрешение для крупных аномалий. Температура измерялась на уровне донных отложений с помощью прибора Flowatch (погрешность ± 0,1 °С).

На ряде контрольных точек на участках «2-й км» и «5-й км» м были проведены вертикальные профили измерений температуры в водной толще, включая донные отложения. Измерения выполнялись на глубинах 0...10...20...30...40...50 и 60 см. Общее количество взятых проб составило 35.

Расчет площади живого сечения (F). Ширина русла разбивалась на отрезки a_i , в концах которых измерялись интервалы глубины h_i . Площадь живого сечения вычислялась как сумма площадей граничных треугольников и набора ширины трапеций [26]:

$$S_1 = a_1 \cdot h_1/2; S_2 = (h_1 + h_2)/2 \cdot a_2; \dots; S_n = h_n \cdot a_n/2 \quad (1)$$

Итоговая площадь $F = \sum S_i$. Расчетная площадь F_r принималась как среднее значение площадей верхнего и нижнего створов:

$$F_r = (F_{\text{верхн}} + F_{\text{нижн}})/2 \quad (2)$$

Расчет вертикального температурного градиента проводился по формуле [27, 28]:

$$G = \frac{\Delta T}{\Delta H}, \quad (3)$$

где:

G - вертикальный температурный градиент, °C/см (или °C/м),

ΔT - изменение температуры между двумя точками, °C,

ΔH - разность глубин между этими точками, см или м.

Для контроля скорости проводились параллельные измерения прибором Flowatch с вертущечной насадкой с погрешностью $\pm 1\%$.

Расчет расхода воды (Q) осуществлялся по формуле [26]:

$$Q = F_r \cdot V, \quad (4)$$

где F_r - расчетная площадь сечения, V - средняя скорость потока.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение температуры вод р. Шаган. Результаты термометрических измерений вдоль русла до 5,4-километрового участка р. Шаган позволили выявить закономерности температурного поля, отражающие особенности взаимодействия поверхностных и подземных вод. Температура вод реки изменялась в диапазоне от 8,5 до 29,7 °C, демонстрируя выраженную пространственную неравномерность. Все термометрические и гидрометрические измерения проводились в летний период, что следует учитывать при интерпретации данных. Точки измерения температур и результаты температурных измерений представлены на рисунке (рисунок 2).

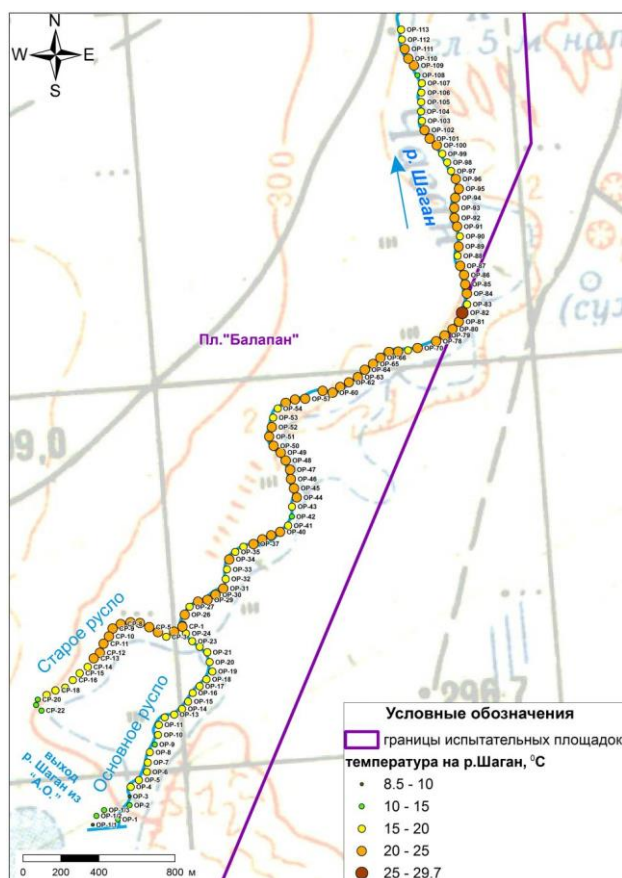


Рисунок 2. Результаты температурных измерений всего р. Шаган вниз по течению

Примечание – составлено авторами

Минимальные значения температуры (< 10 °C) отмечены на участках 50 м и 300 м вдоль старого русла, а также на створах 2650...2800 м и 4950...5350 м вдоль основного

русла. Эти зоны характеризуются устойчивыми отрицательными температурными аномалиями по отношению к средним фоновым значениям и соответствуют участкам разгрузки подземных вод, загрязненных тритием.

Температурный контраст между поверхностным потоком и водами, поступающими из подземных горизонтов, наиболее четко проявляется в середине руслового отрезка (2,5...5,5 км), где наблюдаются переходные зоны с чередованием «теплых» и «холодных» интервалов. Это указывает на чередование подпитки и фильтрационных потерь, а также на сложный характер руслового питания реки за счет вод, мигрирующих из зоны подземных ядерных взрывов площадки «Балапан». В связи с этим, данные участки были выбраны как вероятные места поступления подземных вод.

Для уточнения характера разгрузки подземных вод проведены детальные вертикальные термопрофильные измерения на двух участках, где ранее были зафиксированы максимальные значения удельной активности трития – до $3,5 \cdot 10^5$ Бк/кг [15]. Эти участки характеризуются пониженными температурами и выраженной стратификацией теплового поля (рисунок 3).

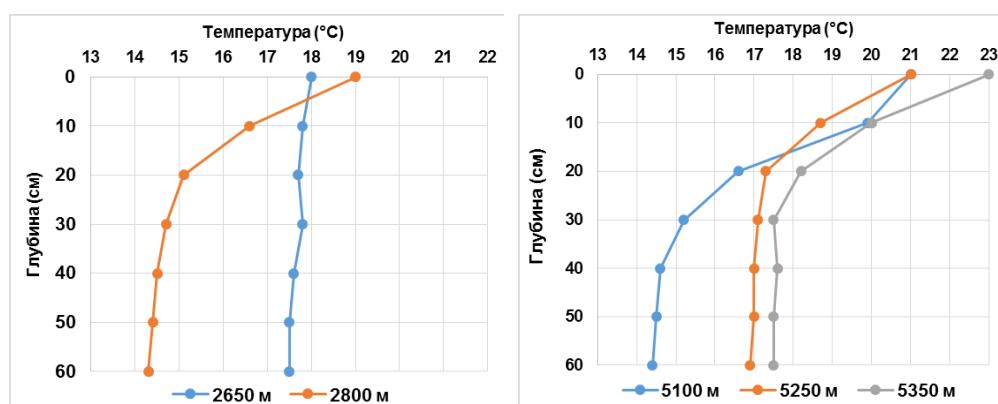


Рисунок 3. Результаты температурных измерений по глубине исследуемых участков «2-й» и «5-й» км р. Шаган вниз по течению.

Примечание – составлено авторами

В пределах данного интервала русла наблюдается отчетливая температурная стратификация водной толщи и донных отложений. Температура у поверхности воды составляла $18,7...23,0$ °C, тогда как на глубине 60 см снижалась до $14,4...14,6$ °C. Средний вертикальный градиент составил $0,08$ °C/см, что соответствует активной разгрузке подземных вод. Вертикальный профиль имеет монотонно нисходящий характер без признаков инверсии, что типично для точечных выходов подземных вод. Визуально на температурной карте участок 2650...2800 м выделяется как зона локального понижения температуры дна, вытянутая вдоль правобережной части русла на 40...50 м. Такая картина подтверждает присутствие подземного потока, поступающего из северо-восточного направления со стороны «Атомного» озера, по слоистым песчано-гравийным прослоям, с выносом тритий содержащей воды в зону контакта с русловыми отложениями.

На участке 5100...5350 м наблюдается аналогичная структура, но с более выраженной стратификацией и низкими значениями температуры. Температура у поверхности составляла $17,0...17,4$ °C, при этом уже на глубине 10 см снижалась до $16,2$ °C, а на глубине 60 см достигала $14,4$ °C. Средний вертикальный градиент - $0,10...0,12$ °C/см.

Оба участка демонстрируют типичные признаки разгрузки плавное понижение температуры с глубиной, устойчивый отрицательный градиент, минимальные значения у дна и локализацию холодных аномалий вдоль берегов. Однако участок 4950...5350 м отличается большей стабильностью температурного профиля и более выраженной

подпиткой снизу, что подтверждает длительное и постоянное поступление подземных вод в русловую часть.

Таким образом, вертикальное распределение температуры служит надежным индикатором фильтрационного притока подземных вод. Совмещение температурных и радиометрических данных подтверждает, что максимальные концентрации трития приурочены к зонам наиболее выраженных отрицательных температурных градиентов. Динамическое равновесие между этими потоками обуславливает характерную многослойность температурного поля, при этом нижняя часть русла остается относительно холодной даже при значительном прогреве поверхностных слоев.

Изменение расхода воды в исследуемых участках «2-й» и «5-й» км р. Шаган вниз по течению. Измерения расхода воды проводились для количественной оценки водообмена в русле р. Шаган и определения гидродинамических условий формирования зон разгрузки подземных вод, содержащих ЗН. Расходные наблюдения являются обязательным компонентом при построении водного баланса, поскольку позволяют установить чередование участков потерь (инфильтрации) и подпитки (эксфильтрации) вдоль течения.

Особое внимание уделялось сопоставлению данных расхода с результатами термометрии. Так, по нашим собственным исследованиям было выявлено, что при разгрузке подземных вод, как правило, наблюдается локальное увеличение расхода и понижение температуры, а при фильтрационных потерях обратная картина. Полученные нами результаты согласуются с наблюдениями других авторов [29...30], показавшими, что подземные воды оказывают регулирующее влияние на термический режим потока, летом они поступают более прохладными в сравнении с температурой воды поверхностного водотока, а зимой - более теплыми. В районах разгрузки подземных вод фиксируется понижение температуры и локальное увеличение расхода, что подтверждает их буферную роль.

Таким образом, целью гидрометрического этапа было не только определение абсолютных значений дебита, но и выявление гидродинамических аномалий, связанных с разгрузкой подземных вод в пределах русла р. Шаган вниз по течению (таблица 1).

Таблица 1

Результаты измерения расхода воды р. Шаган вниз по течению

Расстояние от озера «Атомное», км	Расход, м ³ /сек	Характер участка
0,5...1,0	0,18...0,21	верхний участок, питание за счет «Атомного» озера
2,65...2,80	0,05...0,06	зона потерь, совпадает с участком пониженной температуры
4,95...5,35	0,08...0,10	зона разгрузки подземных вод
10...30	0,01...0,03	потери в песчано-гравийные отложения
50...55	0,07...0,10	подпитка за счет подземного стока
63...70	0,03...0,05	стабилизация расхода, равновесная зона
100...110	0,18...0,21	нижний створ, питание за счет притоков и инфильтрации из поймы

Результаты наблюдений показали, что расход воды по длине русла изменяется неравномерно, от 0,01 до 0,21 м³/с (10...210 л/с). При этом следует отметить, что в зоне впадения притока р. Ащису расход воды составляет от 570 до 1300 л/с [31]. На отдельных створах зафиксированы кратковременные пики расхода, совпадающие с зонами минимальных температур и повышенных активностей трития. Так, в верхнем участке русла (0...0,5 км от выхода из «Атомного» озера) расход составляет 0,18...0,21 м³/с, что соответствует зоне устойчивого поверхностного питания. В пределах 2...3 км происходит резкое снижение расхода до 0,05...0,06 м³/с, что связано с фильтрацией воды через

песчаные и галечниковые отложения, совпадающее с зоной разгрузки подземных вод (по данным термометрии - понижение температуры до 14,4 °С). Далее, между 3,0 и 5,3 км, расход вновь уменьшается до 0,02...0,03 м³/с, что указывает на участки потерь и рассеивания потока. В нижней части русла, на 4,95...5,35 км, зафиксировано вторичное повышение расхода до 0,08...0,10 м³/с, совпадающее с холодной аномалией (Т = 13,8...14,0 °С) и повышенным содержанием трития (до 3,5·10⁵ Бк/кг). В устьевой зоне (ниже 6 км) расход стабилизируется на уровне 0,20...0,21 м³/с за счет подпитки подземных стоков с прилегающей поймы.

Суммарно, на всем протяжении русла наблюдается чередование зон потерь и подпитки, что типично для маловодных рек в аллювиальных долинах с развитым подземным стоком [32, 34]. Эти участки напрямую коррелируют с температурными аномалиями, выявленными при термометрии.

Для поверхностных вод р. Шаган начиная с выхода из «Атомного» озера, до впадения в р. Ерчис построен график изменения расхода реки (рисунок 4).

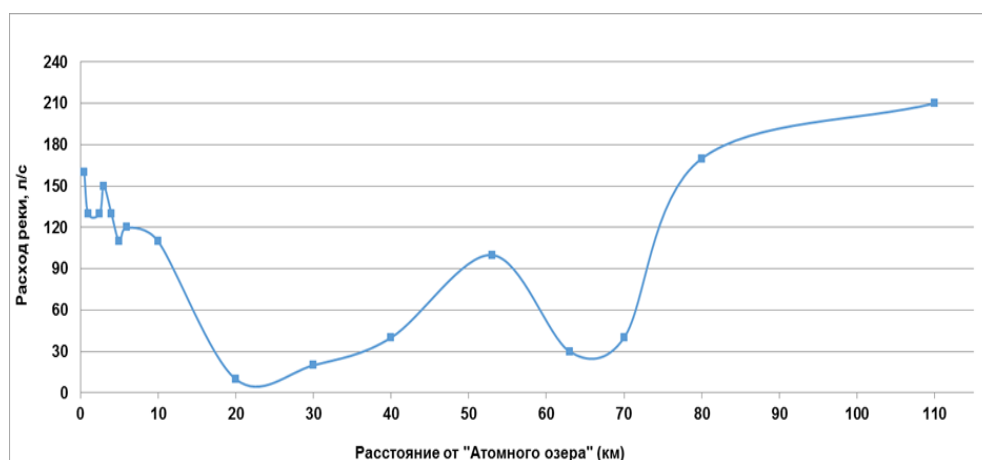


Рисунок 4. Изменение расхода воды р. Шаган вниз по течению

Примечание – составлено авторами

Согласно представленным данным, на всем протяжении р. Шаган отмечаются изменения расхода поверхностных вод. На участке с 0,5 до 6 км отмечаются резкие перепады в пределах 110...160 л/с, начиная с 10 км, расход воды уменьшается до 10 л/с. На 53 км, отмечается увеличение расхода до 100 л, далее наблюдается уменьшение до 30 л/с на 63 км. В районе впадения р. Шаган, в р. Ерчис расход воды увеличивается до максимальных 210 л/с.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные термометрические и гидрометрические исследования подтвердили существование активных зон разгрузки подземных вод, поступающих из области подземных ядерных взрывов испытательной площадки «Балапан».

Установлено, что глубинное перераспределение ЗН формируется в зонах отрицательным температурным градиентом и фиксируется в непосредственной связи с понижением температуры воды до 13,8...14,5 °С.

Расход воды в р. Шаган изменяется в пределах от 10 до 270 л/с, а в зоне впадения притока р. Ащису от 570 до 1300 л/с.

Для улучшения прогноза миграции ЗН и влияния подземных вод на сток реки Шаган рекомендуется организовать круглогодичный мониторинг:

– разместить 5...7 контрольных станций вдоль реки - в верхнем, среднем и нижнем течении, а также около притоков и возможных зон выхода подземных вод;

– проводить гидрометрические замеры и гидрохимические измерения содержания ЗН в воде раз в квартал, с увеличением частоты во время весеннего паводка и осенних дождей.

Ограничения исследования:

– нет данных за зиму, не учитываются сезонные колебания температуры и расхода воды;

– недостаточное количество измерений содержания ЗН, что ограничивает полностью оценить движение загрязнения в подземных водах;

– малый охват территории по оценке температурного показателя и содержания ЗН измерения проводились в зоне разгрузки подземных вод на участках «2-й км» и «5-й км».

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

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

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – АЕТ, МРА, ЛХА; управление данными – МРА, АЕТ, ЖАБ; формальный анализ – МРА, АЕТ, НЖМ; методология – АЕТ, МРА, АЖС; программное обеспечение – МРА, АЕТ, НАБ; мониторинг – МРА, АЕТ, НЖМ; визуализация – МРА, АЕТ; написание первоначального проекта – АЕТ, МРА; написание обзора и редактирование – АЕТ, МРА, ЖАБ.

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 АР22783154) при финансировании Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seraya, N., Daumova, G., Petrova, O., Garcia-Mira, R., & Polyakova, A. (2025). Ecological status of the small rivers of the East Kazakhstan region. *Sustainability*, 17, 6525. <https://doi.org/10.3390/su17146525>;
2. Жуков И.А., Айбулатов Д.Н. Изменения годового модуля стока малых рек российской части бассейна реки Урал // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 2. С. 72–89. <https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-72-89>;
3. Lou, Y., Horner-Devine, A. R., Derakhti, M., Giddings, S. N., Spydell, M. S., Rodriguez, A., & Simpson, A. (2025). Dynamics and scaling of a small river discharging into the surf zone. *Journal of Physical Oceanography*, 55, 1255–1276. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-24-0072.1>;
4. Bayrak, G. (2025). Geological and geomorphological factors of the small rivers morphodynamics (on the example of the Chechva River, Limnitsa tributaries). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1, 5–14. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.01>;
5. Gusarov, A., & Beylich, A. (2025). Anthropocene trends in water flow of small and medium-sized rivers in the east of the East European Plain: The forest-steppe and steppe zones. *Hydrology*, 12, 242. <https://doi.org/10.3390/hydrology12090242>
6. Гидрологические ежегодники бассейна Карского моря (западная часть). Бассейны рек Иртыша, Оби ниже устья р. Иртыша и рек Обской губы к западу до границы с Баренцевым морем. - Омск: Омское управление гидрометеорологической службы, 1951-1977. - (Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Ч. 1: Реки и каналы; Ч. 2: Озера и водохранилища).
7. Гидрологические ежегодники бассейна Карского моря (западная часть). Бассейны рек Иртыша, Оби ниже устья р. Иртыша и рек Обской губы к западу до границы с Баренцевым морем. - Омск: Омское территориальное управление по гидрометеорологии и контролю природной среды, 1978-1980. - (Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Ч. 1: Реки и каналы; Ч. 2: Озера и водохранилища).
8. Гидрологические ежегодники бассейнов Иртыша, Ишима и Тобола (верхнее течение). - Алматы: Казахское республиканское управление по гидрометеорологии и контролю природной среды, 1981-1985. - (Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Ч. 1: Реки и каналы; Ч. 2: Озера и водохранилища).
9. Гидрологические ежегодники бассейнов Иртыша, Ишима и Тобола (верхнее течение). - Алматы: Казахское республиканское управление по гидрометеорологии, 1986-1989. - (Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Ч. 1: Реки и каналы; Ч. 2: Озера и водохранилища).
10. Гидрологические ежегодники бассейнов Иртыша, Ишима и Тобола (верхнее течение). - Алматы: Главное управление по гидрометеорологии при Кабинете Министров Республики Казахстан, 1990-1992. - (Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Ч. 1: Реки и каналы; Ч. 2: Озера и водохранилища).

11. Гидрологические ежегодники бассейнов Иртыша, Ишима и Тобола (верхнее течение). - Алматы: Главное управление по гидрометеорологии Республики Казахстан, 1993. - (Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Ч. 1: Реки и каналы; Ч. 2: Озера и водохранилища)
12. Aidarkhanova, A., Larionova, N., Tleukanova, Zh., Mamyrbaeva, A., Ermakova, R., Svetacheva, Y., Aktayev, M., & Panitskiy, A. (2022). The character of radionuclide contamination of natural lakes at the territory of the Semipalatinsk test site. *Journal of Environmental Radioactivity*, 255, 107041. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.107041>
13. Aktayev, M., Subbotin, S., Aidarkhanov, A., Aidarkhanova, A., Timonova, L., & 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(3), e0300971. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300971>
14. Темиржанова А., Байгазинов Ж., Мухамедияров Н., Актаев М., Дускаев К. Химические элементы донных отложений загрязненного участка реки Шаган // Гидрометеорология и экология. — 2025. — Т. 119, № 4. — С. 190–204. — DOI: 10.54668/2789-6323-2025-119-4-190-204
15. Aktayev, M. R., Toktaganov, T. Sh., Akbayeva, L. Kh., & Lyakhova, O. N. (2023). Research on the conditions of water formation in radiation-hazardous sites of the Semipalatinsk test point. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*, 5(461), 35–44. <https://doi.org/10.32014/2023.2518-170X.329>
16. Актаев М. Р., Айдарханов А. О., Айдарханова А. К., Пронин С. С., Искенов А. О. Мониторинг тритиевого загрязнения вод р. Шаган // Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстан (НЯЦ РК). — 2021. — Вып. 2 (86). — С. 25–29. — ISSN 1729-7516. — DOI: 10.52676/1729-7885-2021-2-25-29
17. Актаев М. Р., Лукашенко С. Н., Айдарханов А. О., Ляхова О. Н., Токтаганов Т. Ш., Токарев И. В. Распределение микро- и макрокомпонентов и искусственных радионуклидов в водоеме «Атомное озеро» // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2019. — Т. 59, № 3. — С. 1–10. — ISSN 0869-8031. — DOI: 10.1134/S0869803119030044
18. Timonova, L., Larionova, N., Aidarkhanova, A., Lyakhova, O., Aktayev, M., Serzhanova, Z., Lukashenko, S., Polevik, V., Dashuk, A., Monayenko, V., Subbotin, S., & Aidarkhanov, A. (2024). Tritium distribution in the “water–soil–air” system in the Semipalatinsk Test Site. *PLOS ONE*, 19(4), e0297017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0297017>
19. Субботин С. Б., Зеленский К. Л., Ларионова Н. В., Романенко В. В., Супрунов В. И., Пронин С. С., Актаев М. Р., Мельничук М. А. Исследование путей миграции радионуклидов с подземными водами в районе боевой скважины 1071 на площадке «Балапан» // Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстан (НЯЦ РК). — 2017. — Вып. 4 (72). — С. 81–90. — ISSN 1729-7516. — URL: https://static.nnc.kz/articles/2017_4_12.pdf
20. Темиржанова А., Байгазинов Ж., Мухамедияров Н., Актаев М., Дускаев К., Турғалиева Д., Берикбол Н., Ануарбекова А. Гидрохимические параметры загрязненных участков реки Шаган в пределах Семипалатинского испытательного полигона // Вестник ЕНУ имени Л. Н. Гумилева. Серия: Химия. География. Экология. — 2025. — Т. 151, № 2. — С. 294–307. — DOI: 10.32523/2616-6771-2025-151-2-294-307
21. Актаев М. Р., Лукашенко С. Н., Айдарханов А. О., Ляхова О. Н. Характер загрязнения тритием вод р. Шаган в районе «Атомного озера» // Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстан (НЯЦ РК). — 2017. — Вып. 4 (72). — С. 5–8. — ISSN 1729-7516. — URL: https://static.nnc.kz/articles/2017_4_01.pdf
22. Essaid, H., Hedef, & Caldwell, R. (2017). Evaluating the impact of irrigation on surface water–groundwater interaction and stream temperature in an agricultural watershed. *Science of The Total Environment*, 599, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.205>
23. Unland, N., Cartwright, I., Anderson, M., Rau, G., Reed, J., Gilfedder, B., Atkinson, A., & Hofmann, H. (2013). Investigating the spatio-temporal variability in groundwater and surface water interactions: A multi-technique approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 3437–3453. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3437-2013>
24. Drewnik, M., Rajwa-Kuligiewicz, A., Stolarczyk, M., Kucharzyk, S., & Żelazny, M. (2017). Intra-annual groundwater levels and water temperature patterns in raised bogs affected by human impact in mountain areas in Poland. *Science of The Total Environment*, 624, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.203>
25. Отчет по гидрогеологическому доизучению, инженерно-геологической и геоэкологической съемке территории листа М-44-XX масштаба 1:200000 за 1999–2003 гг. / Т.Ф. Амбалова. — Караганда : Геолого-геофизическое открытое АО "Азимут", 2003.
26. Методические указания ГСИ. Расход воды на реках и каналах. Методика выполнения измерений методом «скорость–площадь» (МИ 1759–87–М). — М.: Издательство стандартов, 1987. - 25 с.
27. Фролов Н. М. Методические рекомендации по изучению режима температуры подземных вод/ВСЕГИНГЕО. М., 1973. 122 с.
28. Lapham, W. W. (1989). Use of temperature profiles beneath streams to determine rates of vertical ground-water flow and vertical hydraulic conductivity (Water-Supply Paper 2337). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/wsp2337>
29. Kaandorp, V. P., Doornbal, P. J., Kooi, H., Broers, H. P., & de Louw, P. G. B. (2019). Temperature buffering by groundwater in ecologically valuable lowland streams under current and future climate conditions. *Journal of Hydrology* X, 3, 100031. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100031>

30. Hare, D. K., Helton, A. M., Johnson, Z. C., Lane, J. W., & Briggs, M. A. (2021). Continental-scale analysis of shallow and deep groundwater contributions to streams. *Nature Communications*, 12(1), 1450. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21651-0>
31. 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
32. Cartwright, I., & Hofmann, H. (2016). Using radon to understand parafluvial flows and the changing locations of groundwater inflows in the Avon River, southeast Australia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(9), 3581–3600. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3581-2016>;
33. Covino, T. P., & McGlynn, B. L. (2007). Stream gains and losses across a mountain-to-valley transition: Impacts on watershed hydrology and stream water chemistry. *Water Resources Research*, 43(W10), W10431. <https://doi.org/10.1029/2006WR005544>;
34. Menció, A., Galán, M., Boix, D., & Mas-Pla, J. (2014). Analysis of stream–aquifer relationships: A comparison between mass balance and Darcy’s law approaches. *Journal of Hydrology*, 517, 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.039>

REFERENCES

1. Seraya, N., Daumova, G., Petrova, O., Garcia-Mira, R., Polyakova, A. (2025). Ecological status of the small rivers of the East Kazakhstan region. *Sustainability*, 17, 6525. <https://doi.org/10.3390/su17146525>
2. Zhukov, I. A., Aibulatov, D. N. (2025). Izmeneniya godovogo modulya stoka malyx rek rossiyskoy chasti basseyna reki Ural [Changes in the annual runoff module of small rivers in the Russian part of the Ural River basin]. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management], (2), 72–89. <https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-72-89> (In Russian).
3. Lou, Y., Horner-Devine, A. R., Derakhti, M., Giddings, S. N., Spydell, M. S., Rodriguez, A., & Simpson, A. (2025). Dynamics and scaling of a small river discharging into the surf zone. *Journal of Physical Oceanography*, 55, 1255–1276. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-24-0072.1>
4. Bayrak, G. (2025). Geological and geomorphological factors of the small rivers morphodynamics (on the example of the Chechva River, Limnitsa tributaries). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1, 5–14. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.01>
5. Gusarov, A., Beylich, A. (2025). Anthropocene trends in water flow of small and medium-sized rivers in the east of the East European Plain: The forest-steppe and steppe zones. *Hydrology*, 12, 242. <https://doi.org/10.3390/hydrology12090242>
6. *Gidrologicheskiye ezhegodniki basseyna Karskogo morya (zapadnaya chast’). Basseyny rek Irtysha, Obi nizhe ust’ya r. Irtysha i rek Obskoy guby k zapadu do granitsy s Barentsevym moryem* [Hydrological Yearbooks of the Kara Sea Basin (Western Part): Basins of the Irtysh, the Ob below the mouth of the Irtysh, and rivers of the Ob Bay westward to the Barents Sea boundary]. (1951–1977). Omsk: Omskoye upravleniye gidrometeorologicheskoy sluzhby. (In Russian).
7. *Gidrologicheskiye ezhegodniki basseyna Karskogo morya (zapadnaya chast’). (1978–1980). Basseyny rek Irtysha, Obi nizhe ust’ya r. Irtysha i rek Obskoy guby k zapadu do granitsy s Barentsevym moryem* [Hydrological Yearbooks of the Kara Sea Basin (Western Part): Basins of the Irtysh, the Ob below the mouth of the Irtysh, and rivers of the Ob Bay westward to the Barents Sea boundary]. Omsk: Omskoye territorial’noye upravleniye po gidrometeorologii i kontrolyu prirodnoy sredy. (In Russian).
8. *Gidrologicheskiye ezhegodniki basseynov Irtysha, Ishima i Tobola (verkhnoye techeniye). (1981–1985). [Hydrological Yearbooks of the Basins of the Irtysh, Ishim, and Tobol Rivers (Upper Reaches)].* Almaty: Kazakhskoye respublikanskoye upravleniye po gidrometeorologii i kontrolyu prirodnoy sredy. (In Russian).
9. *Gidrologicheskiye ezhegodniki basseynov Irtysha, Ishima i Tobola (verkhnoye techeniye). (1986–1989). [Hydrological Yearbooks of the Basins of the Irtysh, Ishim, and Tobol Rivers (Upper Reaches)].* Almaty: Kazakhskoye respublikanskoye upravleniye po gidrometeorologii. (In Russian).
10. *Gidrologicheskiye ezhegodniki basseynov Irtysha, Ishima i Tobola (verkhnoye techeniye). (1990–1992). [Hydrological Yearbooks of the Basins of the Irtysh, Ishim, and Tobol Rivers (Upper Reaches)].* Almaty: Glavnoye upravleniye po gidrometeorologii pri Kabinete Ministrov Respubliki Kazakhstan. (In Russian).
11. *Gidrologicheskiye ezhegodniki basseynov Irtysha, Ishima i Tobola (verkhnoye techeniye). (1993). [Hydrological Yearbooks of the Basins of the Irtysh, Ishim, and Tobol Rivers (Upper Reaches)].* Almaty: Glavnoye upravleniye po gidrometeorologii Respubliki Kazakhstan. (In Russian).
12. Aidarkhanova, A., Larionova, N., Tleukanova, Zh., Mamyrbayeva, A., Ermakova, R., Svetacheva, Y., Aktayev, M., & Panitskiy, A. (2022). The character of radionuclide contamination of natural lakes at the territory of the Semipalatinsk test site. *Journal of Environmental Radioactivity*, 255, 107041. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.107041>

13. Aktayev, M., Subbotin, S., Aidarkhanov, A., Aidarkhanova, A., Timonova, L., & 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(3), e0300971. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300971>
14. Temirzhanova, A., Baigazinov, Zh., Mukhamediyarov, N., Aktaev, M., & Duskayev, K. (2025). Khimicheskiye elementy donnykh otlozheniy zagryaznennogo uchastka reki Shagan [Chemical elements of bottom sediments of the contaminated section of the Shagan River]. *Gidrometeorologiya i ekologiya* [Hydrometeorology and Ecology], 119(4), 190–204. <https://doi.org/10.54668/2789-6323-2025-119-4-190-204> (In Russian).
15. Aktayev, M. R., Toktaganov, T. Sh., Akbayeva, L. Kh., & Lyakhova, O. N. (2023). Research on the conditions of water formation in radiation-hazardous sites of the Semipalatinsk test point. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*, 5(461), 35–44. <https://doi.org/10.32014/2023.2518-170X.329>
16. Aktaev, M. R., Aidarkhanov, A. O., Aidarkhanova, A. K., Pronin, S. S., & Iskenov, A. O. (2021). Monitoring tritиеvogo zagryazneniya vod r. Shagan [Monitoring of tritium contamination in the waters of the Shagan River]. *Vestnik Natsional'nogo yadernogo tsentra Respubliki Kazakhstan (NYaTs RK)* [Bulletin of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan], (2[86]), 25–29. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-2-25-29> (In Russian).
17. 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 vodoyeme “Atomnoye ozero” [Distribution of micro- and macrocomponents and artificial radionuclides in the "Atomic Lake" reservoir]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation Biology. Radioecology], 59(3), 1–10. <https://doi.org/10.1134/S0869803119030044> (In Russian).
18. Timonova, L., Larionova, N., Aidarkhanova, A., Lyakhova, O., Aktayev, M., Serzhanova, Z., Lukashenko, S., Polevik, V., Dashuk, A., Monayenko, V., Subbotin, S., & Aidarkhanov, A. (2024). Tritium distribution in the “water–soil–air” system in the Semipalatinsk Test Site. *PLOS ONE*, 19(4), e0297017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0297017>
19. Subbotin, S. B., Zelenskiy, K. L., Larionova, N. V., Romanenko, V. V., Suprunov, V. I., Pronin, S. S., Aktaev, M. R., & Melnichuk, M. A. (2017). Issledovaniye putey migratsii radionuklidov s podzemnymi vodami v rayone boyevoy skvazhiny 1071 na ploshchadke “Balapan” [Investigation of radionuclide migration pathways with groundwater in the area of borehole 1071 at the Balapan site]. *Vestnik Natsional'nogo yadernogo tsentra Respubliki Kazakhstan (NYaTs RK)* [Bulletin of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan], 4(72), 81–90. https://static.nnc.kz/articles/2017_4_12.pdf (In Russian).
20. Temirzhanova, A., Baigazinov, Zh., Mukhamediyarov, N., Aktaev, M., Duskayev, K., Turgaliev, D., Berikbol, N., & Anuarbekova, A. (2025). Gidrokhimicheskiye parametry zagryaznennykh uchastkov reki Shagan v predelakh Semipalatinskogo ispytatelnogo poligona [Hydrochemical parameters of contaminated sections of the Shagan River within the Semipalatinsk Test Site]. *Vestnik ENU imeni L. N. Gumilyova. Seriya: Khimiya. Geografiya. Ekologiya* [Bulletin of L. N. Gumilyov ENU. Series: Chemistry. Geography. Ecology], 151(2), 294–307. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-151-2-294-307> (In Russian).
21. Aktaev, M. R., Lukashenko, S. N., Aidarkhanov, A. O., & Lyakhova, O. N. (2017). Kharakter zagryazneniya tritiem vod r. Shagan v rayone “Atomnogo ozera” [Character of tritium contamination in the waters of the Shagan River in the “Atomic Lake” area]. *Vestnik Natsional'nogo yadernogo tsentra Respubliki Kazakhstan (NYaTs RK)* [Bulletin of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan], 4(72), 5–8. https://static.nnc.kz/articles/2017_4_01.pdf (In Russian).
22. Essaid, H., Hedef, & Caldwell, R. (2017). Evaluating the impact of irrigation on surface water–groundwater interaction and stream temperature in an agricultural watershed. *Science of The Total Environment*, 599, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.205>
23. Unland, N., Cartwright, I., Anderson, M., Rau, G., Reed, J., Gilfedder, B., Atkinson, A., & Hofmann, H. (2013). Investigating the spatio-temporal variability in groundwater and surface water interactions: A multi-technique approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 3437–3453. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3437-2013>
24. Drewnik, M., Rajwa-Kuligiewicz, A., Stolarczyk, M., Kucharzyk, S., & Żelazny, M. (2017). Intra-annual groundwater levels and water temperature patterns in raised bogs affected by human impact in mountain areas in Poland. *Science of The Total Environment*, 624, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.203>
25. Otchet po gidrogeologicheskomu doizucheniyu, inzhenerno-geologicheskoy i geoekologicheskoy s'emke territorii lista M-44-XX masshtaba 1:200000 za 1999–2003 gg. [Report on hydrogeological, engineering-geological, and geoeological survey of the territory of sheet M-44-XX at 1:200000 scale for 1999–2003] / T.F. Ambalova. — Karaganda : Geologo-geofizicheskoe otkrytoe AO “Azimut”, 2003.
26. Metodicheskiye ukazaniya GSI. (1987). Raskhod vody na rekakh i kanalakh. Metodika vypolneniya izmereniy metodom “skorost’–ploshchad” (MI 1759–87–M) [Water discharge in rivers and channels: Measurement method “velocity–area”]. Moscow: Izdatel'stvo standartov. (In Russian).
27. Frolov, N. M. (1973). Metodicheskiye rekomendatsii po izucheniyu rezhima temperatury podzemnykh vod [Methodological recommendations for studying the temperature regime of groundwater]. Moscow: VSEGINGEO. (In Russian).

28. Lapham, W. W. (1989). Use of temperature profiles beneath streams to determine rates of vertical ground-water flow and vertical hydraulic conductivity (Water-Supply Paper 2337). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/wsp2337>
29. Kaandorp, V. P., Doornenbal, P. J., Kooi, H., Broers, H. P., & de Louw, P. G. B. (2019). Temperature buffering by groundwater in ecologically valuable lowland streams under current and future climate conditions. *Journal of Hydrology* X, 3, 100031. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100031>;
30. Hare, D. K., Helton, A. M., Johnson, Z. C., Lane, J. W., & Briggs, M. A. (2021). Continental-scale analysis of shallow and deep groundwater contributions to streams. *Nature Communications*, 12(1), 1450. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21651-0>
31. 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 osnovnyye mekhanizmy yeye formirovaniya [The state of the Shagan River ecosystem and the main mechanisms of its formation]. In *Aktual'nyye voprosy radioekologii Kazakhstana* [Topical Issues of Radioecology of Kazakhstan] (Vol. 2, pp. 9–55). Semipalatinsk: Dom pechati. https://irse.nnc.kz/wp-content/uploads/2018/10/Vypusk_2_rus.pdf (In Russian).
32. Cartwright, I., & Hofmann, H. (2016). Using radon to understand parafluvial flows and the changing locations of groundwater inflows in the Avon River, southeast Australia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(9), 3581–3600. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3581-2016>
33. Covino, T. P., & McGlynn, B. L. (2007). Stream gains and losses across a mountain-to-valley transition: Impacts on watershed hydrology and stream water chemistry. *Water Resources Research*, 43(W10), W10431. <https://doi.org/10.1029/2006WR005544>
34. Menció, A., Galán, M., Boix, D., & Mas-Pla, J. (2014). Analysis of stream–aquifer relationships: A comparison between mass balance and Darcy's law approaches. *Journal of Hydrology*, 517, 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.039>

ШАҒАН ӨЗЕНІНІҢ ТРИТИЙМЕН ЛАСТАНУ АЙМАҚТАРЫНДА ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ РЕЖИМ МЕН СУ ШЫҒЫНЫН ЗЕРТТЕУ

Арай Е. Темиржанова¹, Медет Р. Актаев^{2,3}, Жанат А. Байгазинов², Нурлан Ж. Мухамедияров^{2,4}, Айнур Ж. Смагулова⁵, Нариман А. Баубек³, Ляйля Х. Акбаева⁶, Javier Rodrigo-Ilari (Хавьер Родриго-Иларий)⁷, Касым К. Дускаев¹

¹ эл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; temirzhanova.aray@mail.ru (АЕТ), kduskaev@gmail.com (ККД)

² «Ядролық технологиялар паркі» АҚ, Курчатова, Қазақстан; medet_aktaev@mail.ru (МПА), zh.baigazinov@gmail.com (ЖАБ), nurlan.eventumlab@gmail.com (НЖМ)

³ «Baiterek Engineering» ЖШС, Астана, Қазақстан; medet_aktaev@mail.ru (МПА), narimanbaubek1982@gmail.com (НАБ)

⁴ «Шәкәрім университеті» КеАҚ, Семей, Қазақстан; nurlan.eventumlab@gmail.com (НЖМ)

⁵ Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті, Астана, Қазақстан; ainura.sed@gmail.com (АЖС)

⁶ «Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Астана қ., Қазақстан; akbaeva659@mail.ru (ЛХА)

⁷ Universitat Politècnica de València (Валенсия Политехникалық университеті), Валенсия, Испания; jrodrigoilari@gmail.com (ХР-И)

*Автор корреспонденциясы: Медет Р. Актаев, temirzhanova.aray@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

жерасты және жерүсті суларының өзара әрекеттесуі, гидрогеология, радиоэкология, жерасты суларының шығу аймақтары

Мақала жайында:

Алынды: 25.12.2023
Қайта қаралды: 30.03.2026
Қабылданды: 06.04.2026
Жарияланды: 01.07.2026

АБСТРАКТ

Зерттеулердің өзектілігі ядролық сынақ аймақтарындағы су экожүйелерінің жағдайын бағалау қажеттілігімен айқындалады, себебі радиоактивті ластанудың салдары табиғи ортада ұзақ уақыт сақталады. Ядролық жарылыстардың әсеріне ұшыраған аймақтарда жерүсті және жерасты суларының радиоактивті ластануы мәселесі негізгі экологиялық проблемалардың бірі болып қала береді. Осындай нысандардың бірі - Семей сынақ полигоны аумағында орналасқан Шаған өзені.

Арнайы назар өзен арнасының ластанған жерасты және жарықшақты сулардың жерүсті ағысына шығу аймақтарына аударылады, себебі бұл радионуклидтердің су жүйесі бойынша таралуына ықпал етеді.

Жұмыста Семей сынақ полигонының «Балапан» алаңының ықпал ету аймағында Шаған өзенінің су температуралық режимі мен ағынын кешенді

зерттеу жүргізілді. Негізгі назар құрамында тритий (3H) бар жерасты суларының шығу учаскелеріне және олардың кеңістіктік-уақыттық өзгергіштігін талдауға бағытталды.

Бұрынғы радиоэкологиялық зерттеулер Шаған өзенінің негізінен ластану деңгейін бағалауға бағытталған болса, осы зерттеуде негізгі назар жер асты және беткі сулардың өзара әрекеттесуіне, оның гидрологиялық режим қалыптасуына және радиоактивті компоненттердің тасымалдануына әсер етуіне аударылған.

Өзен арнасы бойымен әр 50 метр сайын жүргізілген термометриялық өлшеулер ұзындығы 5,4 км болатын бөлікте аномальды төмен температуралы (8,5...10 0C) аймақтарды анықтауға мүмкіндік берді, бұл учаскелер ластанған жерасты суларының шығу аймақтарына сәйкес келеді.

Гидрометриялық өлшеулер нәтижесінде судың шығыны 0,01...0,21 м³/с аралығында өзгертіні және сүзілудің салдарынан ағынның айтарлықтай жоғалуы байқалатыны анықталды. 3H ең жоғары меншікті белсенділігі өзен арнасының түбінде, «Атом» көлінен төмен қарай 2650...2800 м және 4950...5350 м қашықтықтағы учаскелерде тіркелді. Бұл температуралық ауытқулар мен жерасты суларының келу процестері арасындағы байланысты дәлелдейді.

STUDY OF THE TEMPERATURE REGIME AND WATER DISCHARGE OF THE SHAGAN RIVER IN AREAS OF TRITIUM CONTAMINATION

Aray Temirzhanova¹, Medet Aktayev^{2,3}, Janat Baigazinov², Nurlan Mukhamediyarov^{2,4}, Ainur Smagulova⁵, Nariman Baubek³, Lyayla Akbaeva⁶, Javier Rodrigo-Illari⁷, Kassym Duskeyev¹

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

² JSC «Park of Nuclear Technologies», Kurchatov, Kazakhstan; medet_aktayev@mail.ru (MRA), zh.baigazinov@gmail.com (ZhAB), nurlan.eventumlab@gmail.com (NZhM)

³ LLC «Baiterek Engineering», Astana, Kazakhstan; medet_aktayev@mail.ru (MRA), narimanbaubek1982@gmail.com (NAB)

⁴ NJSC «Shakarim University», Semey, Kazakhstan; nurlan.eventumlab@gmail.com (NZhM)

⁵ Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan; ainura.sed@gmail.com (AZhS)

⁶ NJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Astana, Kazakhstan; akbaeva659@mail.ru (LChA)

⁷ Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain; jrodrigoillarri@gmail.com (JR-I)

* Corresponding author: Medet Aktayev, medet_aktayev@mail.ru

KEY WORDS

groundwater–surface water interaction, hydrogeology, radioecology, exfiltration zones

About article:

Received: 25.12.2025

Revised: 30.03.2026

Accepted: 06.04.2026

Published: 01.07.2026

ABSTRACT

The relevance of research into the state of aquatic ecosystems in nuclear test areas is determined by the long-term persistence of the effects of radioactive contamination in natural environments. In areas exposed to nuclear explosions, the problem of radioactive contamination of surface and groundwater remains one of the key environmental challenges. One such site is the Shagan River, located on the territory of the Semipalatinsk test site. Particular attention is paid to sections of the riverbed where contaminated groundwater and fissure water discharge into surface watercourses, contributing to the further spread of radionuclides in the water system. A comprehensive study of the temperature regime and water flow of the Shagan River within the zone of influence of the Balapan test site of the Semipalatinsk test site was conducted. The main focus was on sections where groundwater containing tritium (3H) discharges and on analyzing their spatial and temporal variability. Unlike previous radioecological studies of the Shagan River, which focused primarily on assessing contamination, this study emphasizes the interaction between

groundwater and surface water and its role in shaping the hydrological regime and transporting radioactive components.

Thermometric measurements taken at 50 m intervals along the riverbed over a distance of 5.4 km revealed zones of abnormally low temperatures (8,5...10 0C) corresponding to areas of discharge of contaminated groundwater. Hydrometric measurements showed that the water flow varies from 0,01 to 0,21 m³/s, with significant losses due to filtration. The maximum specific activity of 3H is recorded at the bottom of the watercourse near sections 2650...2800 m and 4950...5350 m downstream from Lake «Atomnoe», confirming the link between temperature anomalies and groundwater inflow.

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