

УДК 556.114.6

DOI: 10.46698/VNC.2025.46.62.001

Оригинальная статья

Природное и антропогенное загрязнение микроэлементами верховий бассейна р. Ардон

Н.В. Реутова^{ORCID}, Т.В. Реутова^{ORCID}, Ф.Р. Дреева^{ORCID}

Кабардино-Балкарский научный центр РАН, Россия, 360000, г. Нальчик,
ул. Балкарова, 2, e-mail: reutova371@mail.ru

Статья поступила: 25.03.2025, доработана: 27.05.2025, принята к публикации: 02.06.2025

Резюме: Актуальность работы. Проблема загрязнения поверхностных вод потенциально токсичными элементами в районах расположения предприятий по добыче и обогащению полиметаллических руд особенно актуальна для горных регионов, т.к. воды в этих регионах имеют низкую способность к самоочищению. При этом ввиду сложности геологического строения молодого горного сооружения проблема природного загрязнения вод заслуживает не меньшего внимания. **Целью** данной работы является сравнительный анализ природного и антропогенного загрязнения поверхностных вод верховий бассейна р. Ардон после рекультивации хвостохранилища. **Материалы и методы.** В районе исследования пробы отбирали в 41 пункте. Отбор производили в период летнего паводка в 2022-2024 годах. В поверхностных водах изучали содержание 14 потенциально токсичных элементов в растворенной форме. Это Ag, Al, As, Cd, Cr, Cu, F, Li⁺, Mn, Mo, Ni, Pb, Sr²⁺, Zn. Все пробы фильтровали через мембранные фильтры с размером пор 0,45 мкм. Концентрации фтора, лития и стронция определяли с использованием метода капиллярного электрофореза на приборе «Капель 104Т». Содержание остальных элементов определяли с использованием атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) на приборе МГА-915. **Результаты работы.** После проведения рекультивации Унальского хвостохранилища в 2019 году в поверхностных водах верховий бассейна р. Ардон, расположенных ниже хвостохранилища, снизились концентрации хрома, молибдена, алюминия, мышьяка, лития, никеля и свинца. В настоящее время природное загрязнение поверхностных вод алюминием, мышьяком, стронцием и литием сопоставимо с антропогенным, связанным с наличием ранее разрабатывавшегося свинцово-цинкового месторождения. В настоящее время обогащение поверхностных вод бассейна р. Ардон алюминием и литием связано в основном с вулканической деятельностью, и в меньшей степени с влиянием хвостохранилища. Не выявлено превышения ПДК для питьевой воды в исследуемых водотоках. Единственным исключением является питьевая вода пос. Садон, в которой ПДК по кадмию превышена в 4 раза, по литию и мышьяку в 2 раза. Кроме того, питьевая вода этого поселка имеет повышенные концентрации цинка и молибдена. Для данного поселка настоятельно рекомендуется изменить источник водоснабжения.

Ключевые слова: поверхностные воды, потенциально токсичные элементы, рекультивация, Садонский свинцово-цинковый комбинат, река Ардон.

Для цитирования: Реутова Н.В., Реутова Т.В., Дреева Ф.Р. Природное и антропогенное загрязнение микроэлементами верховий бассейна р. Ардон. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 219-230. DOI: 10.46698/VNC.2025.46.62.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.46.62.001

Original paper

Natural and anthropogenic microelement pollution of the upper reaches of the Ardon River basin

N.V. Reutova^{ORCID}, T.V. Reutova^{ORCID}, F.R. Dreeva^{ORCID}

Kabardino-Balkar Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 2 Balkarova Str., Nalchik
360000, Russian Federation, e-mail: reutova371@mail.ru

Received: 25.03.2025, revised: 27.05.2025, accepted: 02.06.2025

Abstract: Relevance. The problem of surface waters contamination with potentially toxic elements in areas where polymetallic ore mining and processing enterprises are located is especially relevant for mountainous regions, since waters in these regions have a low ability to self-purify. Due to the complexity of the geological structure of the young mining facility, the problem of natural water pollution deserves attention. **The aim** of this work is a comparative analysis of natural and anthropogenic surface waters pollution of the upper reaches of the Ardon River basin after the remediation of the tailings dam. **Materials and methods.** Samples were taken at 41 sampling points in the study area. The sampling was carried out during the summer flood in 2022-2024. The content of 14 potentially toxic elements in dissolved form was studied in surface waters. These are Ag, Al, As, Cd, Cr, Cu, F, Li⁺, Mn, Mo, Ni, Pb, Sr²⁺, Zn. All samples were filtered through membrane filters with a pore size of 0.45 microns. The concentrations of fluorine, lithium, and strontium were determined using capillary electrophoresis. The content of other elements was determined using atomic absorption spectrometry (AAS). **Results.** Concentrations of chromium, molybdenum, aluminum, arsenic, lithium, nickel and lead decreased in the surface waters of the upper reaches of the Ardon River basin after remediation of the Unal tailings dam in 2019. Currently, natural contamination of surface waters with aluminum, arsenic, strontium, and lithium is comparable to anthropogenic pollution associated with the presence of a lead-zinc deposit that was previously developed. At the present time, the enrichment of the surface waters of the Ardon River basin with aluminum and lithium is mainly due to volcanic activity, and to a lesser extent to the influence of the tailings dam. There was no excess of the maximum permissible concentration for drinking water in the studied watercourses. The only exception is the drinking water of the industrial settlement Sadon, in which the maximum permissible concentration for cadmium is exceeded by 4 times, for lithium and arsenic by 2 times. In addition, the drinking water of this settlement has high concentrations of zinc and molybdenum. It is strongly recommended to change the water supply source for this settlement.

Keywords: surface waters, potentially toxic elements, remediation, Sadon lead-zinc factory, Ardon River.

For citation: Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R. Natural and anthropogenic microelement pollution of the upper reaches of the Ardon River basin. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 219-230. DOI: 10.46698/VNC.2025.46.62.001

Введение

Проблема загрязнения поверхностных вод потенциально токсичными элементами в районах расположения предприятий по добыче и обогащению полиметаллических руд особенно актуальна для горных регионов. Поверхностные воды в этих районах имеют низкую способность к самоочищению из-за низких температур, высокой скорости течения и слабого развития биоты. Одним из таких районов является месторождение свинцово-цинковых руд Садонского горнорудного района (Северная Осетия-Алания), которое расположено в верховьях бассейна р. Ардон. В нём действовало семь рудников, руда из которых поставлялась на Мизурскую горно-обогатительную фабрику, открытую в 1929 году [Гурбанов и др., 2012]. Вплоть

В поверхностных водах изучали содержание 14 элементов в растворенной форме. Это Ag, Al, As, Cd, Cr, Cu, F⁻, Li⁺, Mn, Mo, Ni, Pb, Sr²⁺, Zn. Концентрации фтора, лития и стронция определяли методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель 104Т». Содержание остальных элементов определяли с использованием атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) на приборе МГА-915.

Результаты и обсуждение

В таблице 1 приведены минимальные, максимальные и средние концентрации потенциально токсичных элементов в поверхностных водах бассейнов трех рек (Закка, Лядон, Мамихдон), охватывающих водосбор зоны формирования р. Ардон до Зарамагского водохранилища и бассейна р. Садон, подверженного антропогенному (постиндустриальному) загрязнению, а также в самой р. Ардон и устьях трех ее притоков (Цеядон, Баддон, Архондон). По руслу р. Ардон три створа расположены до впадения р. Садон, в бассейне которой находится свинцово-цинковое месторождение. Створ на 66,3 км расположен ниже Унальского хвостохранилища. В 2019 году была произведена рекультивация этого хвостохранилища и к моменту проведения данных исследований «защитного» озера уже не было. Хвостохранилище представляло собой сухой луг, покрытый травянистой растительностью.

В таблице 1 не приведены данные по ряду элементов, поскольку их концентрации были очень низкими, меньше кларковых значений, и варьировали незначительно. Так концентрации серебра колебались в пределах 0,008-0,06 мкг/дм³. Содержание кадмия варьировало в пределах 0,02-0,03 мкг/дм³. Только в ручье из штольни и в питьевой воде пос. Садон концентрации кадмия составили 3,7 и 3,8 мкг/дм³ соответственно. Если сравнить наши данные по кадмию с имеющимися в литературе, то они хорошо согласуются. Так по данным [Гурбанов и др., 2012; 2020] концентрации кадмия в воде р. Ардон колебались в пределах 0,08-0,12 мкг/дм³. По данным Д.Н. Чигоевой с соавторами [2018] концентрации кадмия в ручье из штольни составили 85 мкг/дм³, что значительно выше наших результатов. Но эти исследования проводились в 2016 году, и определялось валовое содержание элементов, поскольку фильтрацию проб не проводили.

Концентрации хрома варьировали от 0,2 до 0,5 мкг/дм³, что более чем в 2 раза ниже кларковых значений (1 мкг/дм³). Ни одного створа с повышенным содержанием хрома мы не выявили. Если сравнить наши результаты с имеющимися литературными данными, то в работе [Гурбанов и др., 2020] содержание хрома варьировало от 0,8 до 6,1 мкг/дм³ в водах р. Садон и р. Ардон ниже ССЦК. Таким образом, содержание хрома в поверхностных водах после проведенной рекультивации снизилось.

Концентрации марганца, в основном, варьировали в пределах 0,6-2,0 мкг/дм³, что значительно ниже кларка (10 мкг/дм³). Более высоким содержанием отличались воды р. Садон (7,25 мкг/дм³), ее притока р. Ходдон (5,98 мкг/дм³) и в створе, расположенном на р. Ардон на 43-м километре её течения (8,97 мкг/дм³). Все эти пункты находятся в зоне расположения ССЦК.

Таблица 1 / Table 1

Содержание микроэлементов мкг/дм³ в поверхностных водах бассейна реки Ардон (мин.-макс./средн.) /
The content of trace elements µg/dm³ in the surface waters of the Ardon River basin ((min.-max./mean)

	Al	As	Cu	F ⁻	Li ⁺	Sr ⁺	Ni	Pb	Zn
Бассейны рек / River basins									
Закка / Zakka	11,3-86,5 23,6	0,1-1,41 0,6	0,4-2,6 1,1	70,1-290,5 146,7	5,9-23,7 13,7	154,9-514,0 316,1	<ПО/РО-0,3 0,2	<ПО/РО-1,0 0,3	11,4-84,5 56,0
Лядон / Lyadon	9,0-420,2 86,0	0,7-13,0 5,4	0,4-3,1 1,7	38,6-188,2 116,4	4,0-15,7 11,0	65,9-270,4 137,0	0,3-1,44 0,7	0,1-0,8 0,4	31,0-90,2 59,9
Мамихдон / Mamichdon	13,8-43,4 20,5	<ПО/РО-0,7 0,3	0,5-1,5 0,8	22,3-154,8 99,3	1,8-18,7 9,3	88,5-561,4 327,0	0,1-0,5 0,3	0,3-0,6 0,4	37,0-66,4 53,46
Садон / Sadon	12,6-84,8 48,8	0,1-4,62 2,21	0,6-2,2 1,9**	128,5-259,8 264,8**	<ПО/РО-21,1 7,8**	37,7-252,6 133,3**	0,1-1,3 0,7	0,5-1,2 0,7	48,6-83,3 69,4**
Реки (расстояние от истока, км) [коэффициент вариации] / Rivers (distance from source, km) [coefficient of variation]									
Ардон/Мамихдон (18,4)* / Ardon/ Mamichdon (18,4)*	43,4(3,56)	0,7(0,08)	1,53(0,00)	86,4[0,027]	6,3[0,045]	270,1[0,07]	0,5(0,01)	0,6(0,07)	56,5(7,48)
Ардон/ Ardon (26,9)	14,5[0,58]	0,9[0,77]	1,1(0,82)	179,9 [0,15]	17,841[0,14]	267,9[0,13]	0,25[0,41]	0,6[0,22]	43,58[0,87]
Цейдон/ Tseyadon (13,5)	20,1[0,37]	0,9[0,22]	1,2[0,80]	77,6[0,33]	0,5[1,73]	41,2[0,37]	0,5[0,29]	0,6[0,06]	35,2[0,53]
Ардон/ Ardon (42,4)*	69,7(0,09)	1,0(0,08)	30,8(1,08)	103,0[0,096]	6,9[0,21]	179,9[0,0011]	0,5(0,00)	1,2(0,07)	<ПО/РО
Баддон/ Baddon (9,5)*	23,7(1,33)	0,3(0,03)	1,3(0,10)	98,6[0,19]	<ПО	36,8[0,021]	0,9(0,22)	0,2(0,03)	73,2(7,75)
Архондон / Archondon (13,7)*	20,5(0,05)	2,76(0,09)	1,6(0,33)	16,0[0,50]	1,5[0]	46,2[0,063]	0,6(0,08)	0,3(0,03)	65,1(7,34)
Ардон/ Ardon (66,3)	76,2[1,07]	5,6(0,39)	2,1[0,82]	179,9[0,15]	17,8[0,14]	267,9[0,13]	0,45[0,88]	0,6[0,39]	30,0[0,93]
ПДК _{питьев.} / MAC _{drink}	500	10	1000	1500	30	7000	100	30	50
Кларки речных вод / Clarks of river waters	160	2	7	100	2,5	50	2,5	1	20

Примечание / Note: <ПО – ниже предела определения / РО – below the limit of determination

* – пробы отбирали однократно / sampled once

** – без учета вод из штолен / excluding water from adits

Но и эти концентрации не превышают кларковых значений. И только в ручье из штольни концентрации марганца достигали 46 мкг/дм^3 . Полученные нами результаты хорошо согласуются с литературными данными [Гурбанов и др., 2012]. Но в исследованиях тех же авторов, проведенных в 2015 году [Гурбанов и др., 2018], приведенные концентрации марганца были в целом на порядок выше.

Концентрации молибдена в 18 пунктах из 41 были ниже предела определения. Только в питьевой воде пос. Садон и в ручье из штольни рядом с этим поселком концентрации составили 2,1 и $8,5 \text{ мкг/дм}^3$ соответственно, а в воде защитного озера в последний год его существования (2018) содержалось $257,1 \text{ мкг/дм}^3$. По данным работы [Гурбанов и др., 2012] концентрации молибдена в водах «защитного» озера достигали 250 мкг/дм^3 . Следовательно, отходы Мизурской горно-обогатительной фабрики были обогащены молибденом. Но к моменту наших исследований в результате проведенной рекультивации озера уже не было, и уровень загрязнения вод реки Ардон ниже хвостохранилища значительно снизился.

Как видно из таблицы 1, концентрации алюминия не превышали кларковых значений. Только в бассейне р. Лядон в двух притоках, берущих своё начало со склонов вулканической постройки Тепли, концентрации алюминия достигали 217 и 420 мкг/дм^3 , что хорошо согласуется с тем фактом, что поступление алюминия в поверхностные воды связано с вулканической деятельностью [Реутова и др., 2024]. В целом, более низкие концентрации алюминия в поверхностных водах Казбекского вулканического района по сравнению с Эльбрусским вулканическим центром могут быть связаны с иммобилизацией алюминия на геохимическом барьере из-за широкораспространенных карбонатных осадочных пород [Савенко, Савенко, 2018].

В работе А.Г. Гурбанова [Гурбанов и др., 2018] приведены концентрации алюминия для водных объектов Унальского хвостохранилища, где они составляли 3194–5775 мкг/дм^3 . Ниже хвостохранилища вниз по течению р. Ардон они колебались от 2592 до 2336 мкг/дм^3 . По нашим данным в воде р. Ардон ниже хвостохранилища концентрация алюминия составила $76,2 \text{ мкг/дм}^3$. Таким образом, в настоящее время природное загрязнение вод верховий бассейна р. Ардон (бассейн р. Лядон), связанное с наличием вулканов, выше, чем антропогенное, обусловленное наличием ныне не действующего ССЦК.

Мы обращаем особое внимание на изучение уровня загрязнения мышьяком поверхностных вод в связи с множественностью источников его поступления и значительной токсичностью для живых организмов [Sasireka et al., 2024; Mohd et al., 2025]. Концентрации мышьяка в поверхностных водах исследуемого района были значительно ниже кларковых значений. Только в пяти пунктах наблюдений они оказались значительно выше. Это в первую очередь р. Лядон, берущая начало с южных склонов г. Тепли (рис. 1), где концентрации от верхнего створа до устья составляли 0,9–1,3. Для р. Архондон, берущей свое начало с северных склонов горного массива Тепли, характерно относительно повышенное содержание As (табл. 1). В районе ССЦК повышенные концентрации мышьяка, сравнимые с Архондоном, выявлены в ручье из штольни и в питьевой воде пос. Садон. Таким образом, и в случае загрязнения мышьяком поверхностных вод верховий бассейна р. Ардон в настоящее время природное загрязнение превышает антропогенное. Но в основном в исследуемом районе концентрации мышьяка очень низкие.

По данным работы [Гурбанов и др., 2018] концентрации мышьяка в р. Ардон в районе пос. Тамиск составили 52 мкг/дм^3 , а в районе г. Алагир 107166 мкг/дм^3 . По

нашим данным таких необычайно высоких концентраций в настоящее время нет.

Содержание меди в поверхностных водах исследуемого района низкое и превышает кларковые значения только в трех пробах бассейна р. Садон. Это р. Ходдон ($7,71 \text{ мкг/дм}^3$), ручей из штольни ($17,3 \text{ мкг/дм}^3$) и р. Ардон до впадения р. Садон ($30,8 \text{ мкг/дм}^3$). Полученные нами данные по концентрациям меди хорошо совпадают с имеющимися в литературе [Гурбанов и др., 2012; 2018; Дзодзикова, 2017]. Изменений концентраций меди в поверхностных водах данного региона, связанных с рекультивацией хвостохранилища, не выявлено.

Средние концентрации фтора в поверхностных водах бассейнов рек в самых верховьях р. Ардон превышают или равны кларковым значениям. Причем, наибольших значений они достигают в районе ССЦК, следовательно, объясняются исключительно антропогенным влиянием. В питьевой воде пос. Садон и ручье из штольни они составляют $792,9$ и $738,5 \text{ мкг/дм}^3$ соответственно. Ни в одном водотоке концентрации фтора не превышали ПДК для питьевой воды. Но, с другой стороны, в поверхностных водах исследуемого региона содержание этого элемента не достигает норм физиологической полноценности, которые составляют $0,5\text{--}1,5 \text{ мг/дм}^3$. Сходная картина наблюдается и в соседнем регионе Центрального Кавказа. В бассейне р. Баксан (левый приток второго порядка р. Терек) в районе расположения Тырныаузского вольфрамowo-молибденового месторождения концентрации фтора также повышены в водотоках отвалов и хвостохранилищ до $6\text{--}9 \text{ мг/дм}^3$ [Реутова и др., 2020].

Однозначный индикатор проявления магматизма это повышение концентраций ионов лития. В исследуемом районе зоны с повышенным и высоким содержанием Li^+ приурочены к вулканическим центрам. Поверхностные воды верховий бассейна р. Ардон значительно обогащены литием. Только в устьях трех притоков, расположенных ниже ССЦК (р. Цеядон, Баддон и Архондон), его концентрации были ниже кларков. Во всех остальных водотоках концентрации лития в $2\text{--}9$ раз превышали кларковые значения. В бассейнах рек Закка, Лядон и Мамихдон это загрязнение носит природный характер, а для р. Садон характерно антропогенное загрязнение. Особенно высокое загрязнение этим элементом отмечено в питьевой воде пос. Садон и ручье из штольни ($68,2$ и $66,6 \text{ мкг/дм}^3$ соответственно). А.Г. Гурбанов с соавторами для района расположения ССЦК и его окрестностей приводят концентрации лития на три порядка превышающие наши данные. Так, в частности, для р. Цеядон 5602 мкг/дм^3 (187 ПДК), а для р. Садон 4284 мкг/дм^3 . Если для р. Садон значительное снижение загрязнения литием можно объяснить результатом рекультивации, то на р. Цеядон и Ардон такой высокий уровень загрязнения, выявленный вышеуказанными авторами, вызывает сомнения.

Поверхностные воды верховий р. Ардон значительно обогащены стронцием. Концентрации в пределах кларковых значений выявлены только в устьях трех притоков – р. Цеядон, р. Архондон и р. Баддон. Наиболее загрязнены стронцием воды бассейнов рек Мамихдон и Закка. В районе расположения ССЦК сопоставимые концентрации выявлены в питьевой воде пос. Садон и ручье из штольни (529 и 515 мкг/дм^3 соответственно). Таким образом, в настоящее время уровни природного и антропогенного загрязнения поверхностных вод стронцием в верховьях бассейна р. Ардон сопоставимы. Полученные данные вполне соответствуют результатам обследований поверхностных вод в районе расположения ССЦК 2010 и 2015 годов, приведенных в работах [Гурбанов и др., 2012; 2018].

Во всех водных объектах исследуемого региона концентрации никеля были более чем в два раза ниже кларковых значений (табл. 1). В ранее проведенных исследованиях 2010 и 2015 годов [Гурбанов и др., 2012; 2018] приведены значительно более высокие концентрации. Так, в р. Ардон в 2010 году концентрации варьировали от 2 до 4 мкг/дм³, а в 2015 – от 2 до 6 мкг/дм³. В р. Садон по данным этих авторов концентрации никеля составляли 1,3 мкг/дм³. Таким образом, концентрации никеля за 10-летний промежуток времени заметно снизились за счет рекультивации хвостохранилища.

Концентрации свинца в поверхностных водах также не превышали кларковых значений. Только в воде из штольни они составили 5,8 мкг/дм³, и были немного повышены до 1-2 мкг/дм³ в р. Садон и питьевой воде пос. Садон. По литературным данным в 2012 и 2015 годах концентрации этого элемента были значительно выше. Так, в р. Архондон они составили 15,4 мкг/дм³, в р. Ардон в районе пос. Тамиск – 13,5 мкг/дм³ [Гурбанов и др., 2018]. По данным работы [Чигоева и др., 2018] в ручье из штольни концентрация свинца составила 42,3 мкг/дм³, в р. Ардон выше ССЦК 6,3 мкг/дм³ и в р. Ардон ниже ССЦК – 3400 мкг/дм³, что вызывает сомнения, даже если предположить, что определяли валовое содержание Pb, а не растворимую форму. Но, тем не менее, после проведенной рекультивации хвостохранилища концентрации свинца в поверхностных водах снизились.

Воды верховий р. Ардон обогащены цинком. Во всех створах они превышали кларковые значения в 1,5-4,5 раза. Единственным исключением является р. Ардон на 43-м километре её течения. В ручье из штольни концентрации цинка составили 435,1 мкг/дм³, а в питьевой воде пос. Садон 363,2 мкг/дм³. По данным работы [Гурбанов и др., 2020] концентрации цинка в воде «защитного» озера и дренажной воде колебались в пределах 1500 мкг/дм³, а в водотоках выше ССЦК хорошо согласуются с нашими данными.

Мы приводим сравнительную таблицу по уровню загрязнения поверхностных вод бассейна р. Ардон до и после проведения рекультивации хвостохранилища. Данные до рекультивации приведены по литературным источникам [Гурбанов и др., 2012; 2020] без учета вод дренажного озера и пульпопровода поскольку к 2022 году его уже не было.

Таблица 2 / Table 2

Содержание микроэлементов мкг/дм³ в поверхностных водах бассейна реки Ардон в районе расположения ССЦК /

The content of trace elements µg/dm³ in the surface waters of the Ardon River basin in the area of the Sadonsky Lead-Zinc Combine

ПТЭ/PTE	2012-2015*	2022-2024	ПТЭ/PTE	2012-2015*	2022-2024
Al	2336-2592	12,6-84,8	Mn	2,1-8,7	6,0-9,0
As	1,3-52,7	0,9-5,6	Mo	247-473	2,1-8,5
Cd	0,08-0,12	0,02-0,03	Ni	1,9-6,1	0,1-0,9
Cr	0,8-6,1	0,2-0,5	Pb	1,2-13,5	0,6-1,2
Cu	2,6-10,5	1,1-2,1	Sr	31,1-275,0	41,2-267,9
Li ⁺	4284-5602	0,5-66,7	Zn	4,1-32,8	30,0-69,4

Примечание: * – Гурбанов и др., 2012; 2020. / Note: * – Gurbanov et al., 2012; 2020.

Выводы

Впервые проведено изучение уровня природного загрязнения в районе верховий бассейна р. Ардон, связанного с наличием природных геохимических аномалий и влиянием современного вулканизма и проведена оценка эффективности рекультивации Унальского хвостохранилища. В результате проведенных исследований выявлено:

- в поверхностных водах бассейна р. Ардон ниже хвостохранилища после рекультивации снизились концентрации хрома, молибдена, алюминия, мышьяка, лития, никеля и свинца;

- в настоящее время природное загрязнение поверхностных вод алюминием, мышьяком, стронцием и литием сопоставимо с антропогенным, связанным с наличием ранее разрабатывавшегося свинцово-цинкового месторождения. Обогащение поверхностных вод бассейна р. Ардон алюминием и литием связано в основном с вулканической деятельностью, и в меньшей степени с влиянием хвостохранилища;

- не выявлено превышения ПДК для питьевой воды в исследуемых водотоках. Единственным исключением является питьевая вода пос. Садон, в которой ПДК по кадмию превышена в 4 раза, по литию в 2 раза. Кроме того, питьевая вода этого поселка имеет повышенные концентрации цинка, мышьяка и молибдена. Для данного поселка настоятельно рекомендуется изменить источник водоснабжения.

Литература

1. Белюченко И.С. Методы рекультивации нарушенных земель. // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2019. – Т. 15. № 1. – С. 4–13.
2. Валиев Н.Г., Голик В.И., Лебзин М.С. Инертность влияния стоков Тырныаузского вольфрамо-молибденового комбината на гидросистемы Северного Кавказа. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2025. – № 1-1. – С. 5–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_5.
3. Голубев Ф.В., Ермаков В.В. Геохимическая экология растений в условиях полиметаллических биогеохимических провинций в бассейне реки Ардон (Северная Осетия). // Труды XII Международной биогеохимической школы «Фундаментальные основы биогеохимических технологий и перспективы их применения в охране природы, сельском хозяйстве и медицине», посвященной 175-летию со дня рождения В.В. Докучаева. Тула: Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, 2021. – С. 429–433.
4. Гурбанов А.Г., Лексин А.Б., Газеев В.М. и др. Экологическое состояние вод реки Ардон и оценка последствий их загрязняющего воздействия на воды реки Терек – объекта рыбохозяйственного значения I категории. // Вестник Владикавказского научного центра. – 2020. – Т. 20. № 1. – С. 50–61. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.56948.
5. Гурбанов А.Г., Лолаев А.Б., Лексин А.Б. и др. Основные источники загрязнения вод р. Ардон, его степень и масштабы проявления, оцененные по результатам геохимического изучения проб воды из контрольных пунктов (PCO-A). // Вестник Владикавказского научного центра. – 2018. – Т. 18. № 3. – С. 40–50.
6. Гурбанов А.Г., Шаззо Ю.К., Лексин А.Б. и др. Промышленные отходы Мизурской горно-обогатительной фабрики Садонского свинцово-цинкового комбината (геохимические особенности, оценка их воздействия на экологическую обстановку прилегающих территорий (почвы и воду р. Ардон) Республика Северная Осетия-Алания). // Вестник Владикавказского научного центра. – 2012. – Т. 12. № 4. – С. 27–40.
7. Дзодзикова М.Э. Ретроспективный анализ химического состояния вод в руслах рек Ардон и Фиагдон в Северной Осетии. // Материалы II Международной научной конференции «Развитие регионов в XXI веке». / Под общ. редакцией А.У. Огоева. – Владикавказ: СОГУ им. К.Л. Хетагурова, 2017. – С. 354–356.

8. Жинжакова Л.З., Чередник Е.А. Многолетние наблюдения за содержанием микропримесей в водах ледниковой реки Ардон за период 2005-2018гг. // *Modern Science*. – 2019. – № 4-2. – С. 24–29.
9. Зверева В.П., Фролов К.Р., Лысенко А.И. Влияние техногенных вод на реку Рудную Дальневосточного региона. // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. № 10. – С. 49–58. DOI: 10.18799/24131830/2022/10/3715.
10. Реутова Т.В., Дреева Ф.Р., Реутова Н.В., Хутуев А.М. Содержание фторидов в речных водах Западной части бассейна реки Терек. // Коллективная монография по материалам X Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа». Грозный: Формат, 2020. – С. 506–512.
11. Реутова Н.В., Реутова Т.В., Дреева Ф.Р. Сравнительная характеристика содержания алюминия и мышьяка в поверхностных водах Эльбрусского и Казбекского вулканических центров. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 231–243. DOI: 10.46698/VNC.2024.80.62.018.
12. Савенко А.В., Савенко В.С. Иммобилизация алюминия на карбонатном геохимическом барьере. // *Наукоемкие технологии*. – 2018 – Т. 19. № 1. – С. 44–47.
13. Сариев А.Х., Чербакова Н.Н., Терентьева Н.Ю. Оценка возможности биологической рекультивации хвостохранилищ на Енисейском Севере. // *Экология и промышленность России*. – 2021. – Т. 25. № 5. – С. 39–45. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-5-39-45.
14. Чигоева Д.Н., Каманина И.З., Каплина С.П. Содержание тяжелых металлов в водотоках в районе Унальского хвостохранилища и реки Ардон. // *Юг России: экология, развитие*. – 2018. – Т. 13. № 2. – С. 113–122. DOI: 10.18470/1992-1098-2018-2-113-122.
15. Chowdhury S.R., Yanful E.K., Pratt A.R. Recycling of nickel smelter slag for arsenic remediation – an experimental study. // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2014. – Vol. 21. – pp. 10096–10107.
16. Kacmaz H. Assessment of heavy metal contamination in natural waters of Dereli, Giresun: an area containing mineral deposits in northeastern Turkey. // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2020. – Vol. 192. No. 2. – pp. 1–12. DOI: 10.1007/s10661-019-8057-0.
17. Mohd S., Fazil Q., Salman A. et al. A Comprehensive review on arsenic contamination in groundwater: sources, detection, mitigation strategies and cost analysis. // *Environmental Research*. – 2025. – Vol. 265. Art. No. 120457. DOI: 10.1016/j.envres.2024.120457.
18. Sasireka R., Vinoth R., Abhishek Sh., Sugumari V., Madheswaran M. Arsenic and environment: a systematic review on arsenic sources, uptake mechanism in plants, health hazards and remediation strategies. // *Topics in Catalysis*. – 2024. – Vol. 67. – pp. 1–17. DOI: 10.1007/s11244-023-01901-9.
19. Simion A.F., Drebenstedt C., Lazar M. The Influence of tailings storage facilities in the eastern part of Jiu valley on the water quality. // *Mining Science and Technology (Russia)*. – 2019. – Vol. 4. No. 4. – pp. 292–301. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-4-292-301.
20. Zhang L., Liu W., Liu S. et al. Revegetation of a barren rare earth mine using native plant species in reciprocal plantation: effect of phytoremediation on soil microbiological communities. // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – Vol. 27. – pp. 2107–2119. DOI: 10.1007/s11356-019-06645-2.

References

1. Belyuchenko I.S. Recultivation methods of recultivation of disturbed lands. *Ecological Bulletin of the North Caucasus*. 2019. Vol. 15. No. 1. pp. 4–13. (In Russ.)
2. Valiev N.G., Golik V.I., Lebzin M.S. Inertness of influence exerted by effluents of Tyrnyauz tungsten-molybdenum plant on hydrological systems of the North Caucasus. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2025. No. 1-1. pp. 5–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_5. (In Russ.)
3. Golubev F.V., Ermakov V.V. Geochemical ecology of plants under conditions of the polymetallic biogeochemical provinces in the basin of Ardon River (North Ossetia). *Proc. of*

the XII Int. Biogeochem. School “Fundamentals of biogeochem. tech. and their applic. prosp. in nat. conserve., agriculture and medicine”. Tula. Tolstoy Tula State Pedagogical University. 2021. pp. 429–433. (In Russ.)

4. Gurbanov A.G., Leksin A.B., Gazeev V.M. et al. The ecological state of the Ardon River waters and assessment of their polluting effects on the Terek River waters – the I category object of the fisheries value. Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center. 2020. Vol. 20. No. 1. pp. 50–61. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.56948 (In Russ.)

5. Gurbanov A.G., Lolaev A.B., Leksin A.B. et al. The main sources of water pollution in the River Ardon, its degree and scale, the evaluation based on the results of geochemical study water samples from control points (RNO-A). Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center. 2018. Vol. 18. No. 3. pp. 40–50. (In Russ.)

6. Gurbanov A.G., Shazzo Yu.K., Leksin A.B. et al. Industrial waste from the Mizur mining and Processing plant of the Sadon Lead-Zinc Combine (geochemical features, assessment of their impact on the environmental situation of the adjacent territories (soil and water of the Ardon River) Republic of North Ossetia-Alania). Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center. 2012. Vol. 12. No. 4. pp. 27–40. (In Russ.)

7. Dzodzikova M.E. A retrospective analysis of the chemical status of waters in the rivers Ardon and Fiagdon in North Ossetia. In: Proceedings of the II International Scientific Conference “Regional Development in the 21st century”. Ed. A.U. Ogoev. Vladikavkaz. K.L. Khetagurov North Ossetian State University. 2017. pp. 354–356. (In Russ.)

8. Zhinzhakova L.Z., Cherednik E.A. Long-term observations of trace elements content in the waters of the glacial river Ardon for the period 2005-2018. Modern Science. 2019. No. 4-2. pp. 24–29. (In Russ.)

9. Zvereva V.P., Frolov K.R., Lysenko A.I. Impact of technogenic waters on the Rudnaya River of the Russian Far East. Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering. 2022. Vol. 333. No. 10. pp. 49–58. DOI: 10.18799/24131830/2022/10/3715. (In Russ.)

10. Reutova T.V., Dreeva F.R., Reutova N.V., Khutuev A.M. Fluoride content in river waters of the Western part of the Terek River basin. In: Proceedings of the X All-Russian Scientific and Technical Conference “Modern problems of geology, geophysics and geocology of the North Caucasus”. Grozny. Format. 2020. pp. 506–512. (In Russ.)

11. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R. Comparative characteristics of aluminum and arsenic content in surface waters of the Elbrus and Kazbek volcanic centers. Geology and Geophysics of Russian South. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 231–243. DOI: 10.46698/VNC.2024.80.62.018. (In Russ.)

12. Savenko A.V., Savenko V.S. Immobilization of aluminum at the carbonate geochemical barrier. High-tech Technologies. 2018. Vol. 19. No. 1. pp. 44–47. (In Russ.)

13. Sariev A.Kh., Shcherbakova N.N., Terentyeva N.Yu. Assessment of the possibility of biological recultivation of tailings in the Yenisei North. Ecology and Industry of Russia. 2021. Vol. 25. No. 5. pp. 39–45. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-5-39-45. (In Russ.)

14. Chigoeva D.N., Kamanina I.Z., Kaplina S.P. Concentration of heavy metals in water flows in the area of Unal tailings dam and Ardon River. South of Russia: Ecology, Development. 2018. Vol. 13. No. 2. pp. 113–122. DOI: 10.18470/1992-1098-2018-2-113-122 (In Russ.)

15. Chowdhury S.R., Yanful E.K., Pratt A.R. Recycling of nickel smelter slag for arsenic remediation – an experimental study. Environmental Science and Pollution Research. 2014. Vol. 21. pp. 10096–10107.

16. Kacmaz H. Assessment of heavy metal contamination in natural waters of Dereli, Giresun: an area containing mineral deposits in northeastern Turkey. Environmental Monitoring and Assessment. 2020. Vol. 192. No. 2. pp. 1–12. DOI: 10.1007/s10661-019-8057-0.

17. Mohd S., Fazil Q., Salman A. et al. A Comprehensive review on arsenic contamination in groundwater: sources, detection, mitigation strategies and cost analysis. Environmental Research. 2025. Vol. 265. Art. No. 120457. DOI: 10.1016/j.envres.2024.120457.

18. Sasireka R., Vinoth R., Abhishek Sh., Sugumari V., Madheswaran M. Arsenic and environment: a systematic review on arsenic sources, uptake mechanism in plants, health hazards and remediation strategies. *Topics in Catalysis*. 2024. Vol. 67. pp. 1–17. DOI: 10.1007/s11244-023-01901-9.
19. Simion A.F., Drebenstedt C., Lazar M. The influence of tailings storage facilities in the eastern part of Jiu valley on the water quality. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2019. Vol. 4. No. 4. pp. 292–301. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-4-292-301.
20. Zhang L., Liu W., Liu S. et al. Revegetation of a barren rare earth mine using native plant species in reciprocal plantation: effect of phytoremediation on soil microbiological communities. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. pp. 2107–2119. DOI: 10.1007/s11356-019-06645-2.