

УДК 502.4 (911.9)

DOI: 10.46698/VNC.2026.63.82.001

Оригинальная статья

Содержание потенциально токсичных химических элементов в растениях бассейнов горных рек Каспийского региона

Е.С. Каширина^{1,2}, Т.Ю. Горбунова^{1,2}, К.Н. Фам¹, З.Ш. Гагаева²

¹ Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН,
Россия, 299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2,
e-mail: e_katerina.05@mail.ru;

² Грозненский государственный нефтяной технический университет
им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, 100

Статья поступила: 16.06.2026, доработана: 10.09.2026, принята к публикации: 00.00.2026

Резюме: Статья посвящена анализу особенностей содержания химических элементов в растениях бассейнов горных рек Каспийского региона. **Актуальность** исследования заключается в выявлении индикаторов повышенного содержания потенциально токсичных химических элементов в ландшафтах бассейнов рек Каспийского региона на основе анализа растений. **Цель исследования** заключается в анализе особенностей накопления потенциально токсичных химических элементов растениями в бассейнах рек Каспийского региона. **Методы исследования.** В полевые сезоны 2024 и 2025 гг. отобраны пробы растений на 193 площадках в бассейнах рек Сунжа, Сулак, Уллучай, Шураозень, Самур, Карачай, Атачай. В растениях речных бассейнов определено содержание 15 химических элементов: Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Li, Be, Mg, Al, Ca, Sc, V, Cr. Определение валового содержания тяжелых металлов и микроэлементов в отобранных пробах растений проведено с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой PlasmaQuant MS Elite S-NR:11-6000ST043. **Результаты исследований.** Ведущими в растениях бассейнов рек Каспийского региона являются биогенные макроэлементы – Ca и Mg. Низкими концентрациями (10^{-10} – 10^{-1} мкг/г) отличаются условно-эссенциальные и потенциально токсичные Be, As, Sc, Li и V. Большинство растений накапливают по одному токсичному элементу. Пять видов проявляют тенденции к накоплению двух элементов: тамариксе (*Tamarix* Sp.) – Be и V, лох узколистный (*Elaeagnus angustifolia*) – Fe и Be, берёза Литвинова (*Betula litwinowii*) – Fe и As, яблоня домашняя (*Malus domestica*) – Be и Sc, ежевика (*Rubus* Sp.) – Fe и V. Анализ средних значений содержания химических элементов по жизненным формам показал, что токсичные элементы интенсивнее накапливаются в травянистых растениях. В растениях бассейнов рек Сулак и Сунжа интенсивнее накапливаются потенциально токсичные Ni и Sc, р. Уллучай – Al, рек Карачай и Атачай – биогенный Ca. Полученные данные о содержании потенциально токсичных химических элементов в растениях могут быть использованы для снижения экологического риска для здоровья населения, проживающего в бассейнах горных рек Каспийского региона.

Ключевые слова: тяжелые металлы, биогеохимическое накопление, Сунжа, Сулак, Уллучай, Шураозень, Самур, Карачай, Атачай.

Благодарности: Работа выполнена в рамках крупного научного проекта «Динамика геоэкологического состояния бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана в условиях изменения климата и растущей антропогенной нагрузки» (Соглашение Минобрнауки РФ № 075-15-2024-644).

Для цитирования: Каширина Е.С., Горбунова Т.Ю., Фам К.Н., Гагаева З.Ш. Содержание потенциально токсичных химических элементов в растениях бассейнов горных рек Каспийского региона. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.63.82.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.63.82.001

Original paper

Content of potentially toxic chemical elements in plants of mountain river basins of the Caspian region

E.S. Kashirina^{1,2}, T.Yu. Gorbunova^{1,2}, K.N. Fam¹, Z.Sh. Gagaeva²

¹ A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences,
2 Nakhimov Ave., Sevastopol 299011, Russian Federation,
e-mail: e_katerina.05@mail.ru;

² Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov,
100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 364051, Russian Federation

Received: 16.06.2026, revised: 10.09.2026, accepted: 00.00.2026

Abstract: This article analyzes the content of potentially toxic chemical elements in plants from the Caspian mountain River basins. **The relevance** of this study lies in identifying indicators of elevated levels of potentially toxic chemical elements in the landscapes of the Caspian River basins based on plant analysis. **The aim** of this study is to analyze the accumulation of potentially toxic chemical elements by plants in the Caspian River basins. **Methods.** In the field seasons of 2024 and 2025, plant samples were collected at 193 sites in the basins of the Sunzha, Sulak, Ulluchay, Shura-Ozen, Samur, Karachay, and Atachay rivers. The content of 15 chemical elements was determined in the plants of the river basins: Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Li, Be, Mg, Al, Ca, Sc, V, and Cr. The gross content of heavy metals and trace elements in the selected plant samples was determined using a PlasmaQuant MS Elite S-NR:11-6000ST043 inductively coupled plasma mass spectrometer. **Results.** The dominant elements in the plants of the river basins of the Caspian region are biogenic macronutrients – Ca and Mg. Conditionally essential and potentially toxic elements such as Be, As, Sc, Li, and V are characterized by low concentrations ($10\text{--}10^{-1}$ µg/g). Most plants accumulate a single toxic element. Five species exhibit a tendency to accumulate two elements: tamarisk (*Tamarix* sp.) – Be and V; narrow leaved oleaster (*Elaeagnus angustifolia*) – Fe and Be; Litvinov's birch (*Betula litwinowii*) – Fe and As; domestic apple (*Malus domestica*) – Be and Sc; blackberry (*Rubus* sp.) – Fe and V. Analysis of the average values of chemical element content by life forms showed that toxic elements accumulate more intensively in herbaceous plants. In plants from the Sulak and Sunzha river basins, potentially toxic Ni and Sc accumulate more intensively; in the Ulluchay River basin, Al accumulates; in the Karachay and Atachay rivers, biogenic Ca accumulates. The data obtained on the content of potentially toxic chemical elements in plants can be used to reduce the environmental risk to the health of the population living in the basins of mountain rivers in the Caspian region.

Keywords: heavy metals, biogeochemical accumulation, Sunzha, Sulak, Ulluchay, Shuraozen, Samur, Karachay, and Atachay.

Acknowledgements: This work was carried out within the framework of a large scientific project “Dynamics of the geoecological state of the mountain river basins of the North-Eastern Caucasus, Azerbaijan and Iran under conditions of climate change and growing anthropogenic load” (Agreement of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 075-15-2024-644).

For citation: Kashirina E.S., Gorbunova T.Yu., Pham C.N., Gagaeva Z.Sh. Content of potentially toxic chemical elements in plants of mountain river basins of the Caspian region. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.63.82.001

Введение

Каспийское море обладает обширным водосбором, охватывающим несколько государств. Воды Каспия формируются различными водотоками: от крупнейшей равнинной Волги до небольших горных рек. Качество воды в Каспийском море во многом определяется свойствами вод рек, впадающих в него. На химический состав речных вод влияют как природные, так и антропогенные факторы.

Одним из индикаторов геоэкологического состояния речных бассейнов является растительный покров, представляющий собой компонент, чувствительный к характеристикам местообитаний. Растения способны накапливать различные химические элементы, как отражение региональных природных особенностей и антропогенного воздействия на ландшафты.

В научных публикациях большое внимание уделяется изучению антропогенного влияния на растительный покров Восточного Кавказа. В регионе наиболее подробно изучены особенности накопления тяжелых металлов тысячелистником обыкновенным (*Achillea millefolium* L.), произрастающим на территории Республики Дагестан. На придорожных территориях, подверженных влиянию выбросов автотранспорта, в растениях отмечаются повышенные содержания Zn, Cu, Pb, Cd [Семенова, 2019; Семенова, Магомедалиев, 2012; Семенова, Анатов, 2022].

Предприятия основной химии являются источником F в растениях Сулакской дельтовой равнины (до 330 мг/кг) в Дагестане [Абакарова и др., 2020]. С деятельностью горнодобывающих предприятий связано повышенное содержание тяжелых металлов в почвах, имеющих техногенное происхождение [Алборов и др., 2026]. Природное повышенное содержание химических элементов в почвах и растениях может быть связано с естественными геохимическими аномалиями. В растениях известнякового округа Горного Дагестана отмечено повышенное содержание Ca и Cr, а в ландшафтах сланцевого округа – их дефицит [Дроздова и др., 2015]. В горнодобывающих районах Центрального Кавказа отмечается обогащение Zn листьев березы, Cd и Zn – листьев ивы и осины [Ermakov et al., 2022].

Повышенное содержание потенциально токсичных химических элементов в растениях может быть обусловлено региональными геохимическими особенностями. Так, в пределах Терско-Кумского артезианского бассейна водные объекты и растения обогащены природным As [Мурзаева и др., 2021; Магомедалиев и др., 2014].

Особое внимание должно быть уделено потенциально токсичным химическим элементам. Накопление токсичных элементов в растениях создает риск их попадания в организм человека через трофические цепи, что представляет угрозу для здоровья населения. Исследования уровня содержания химических элементов, представляющих потенциальную опасность для населения, в растениях дополняют знания об их распределении в бассейнах горных рек Каспийского региона. Более того, потенциально токсичные химические элементы вместе со стоком рек могут попадать в Каспийское море, приводя к загрязнению его вод.

Цель настоящего исследования – выявить уровни накопления растениями потенциально токсичных химических элементов в бассейнах горных рек Каспийского региона.

Материал и методы исследования

Территория исследования. В работе изучены территории бассейнов горных рек водосбора Каспийского моря: Сунжи, Сулака, Уллучая, Шураозеня, Самура (Россия), Карачая, Атачая (Азербайджан). Реки расположены в регионе Восточного Кавказа, берут начало на склонах гор (рис. 1). В верхнем и среднем течении они представляют собой типичные горные реки, в нижнем – их режим ближе к равнинным. Реки полноводные, с бурным течением, весенне-летними половодьями и паводками; зимой не замерзают.

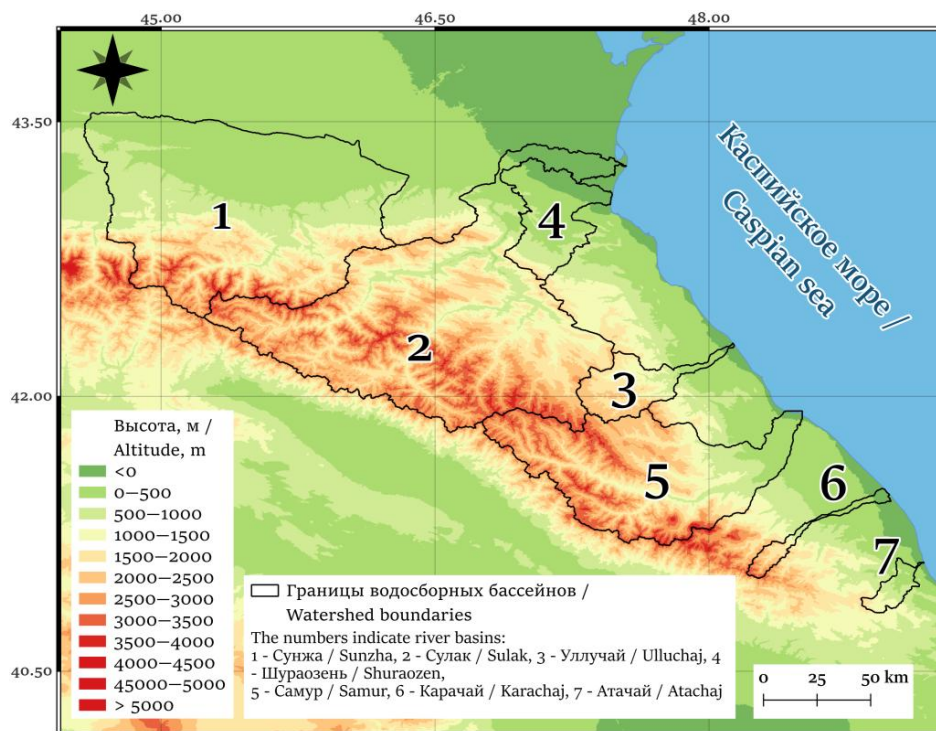


Рис. 1. Схема расположения района исследований на гипсометрической карте /
Fig. 1. The Layout of the research area on the hypsometric map

Бассейны горных рек Восточного Кавказа отличаются сложными геолого-геоморфологическими условиями. Геологическое строение включает черносланцевую формацию нижней и средней юры, шельфовые терригенно-карбонатные отложения верхней юры, олигоцен-неогеновую молассу в верхних, средних и нижних частях соответственно [Государственная геологическая..., 2011].

Почвенно-растительный покров региона – один из самых разнообразных: от горных ледников до полупустынь Прикаспийской низменности. В горной части выражена вертикальная зональность восточнокавказского (дагестанского) типа с поясами полупустынь, сухих степей, ксерофитных кустарников и редколесий в низкогорьях. В среднегорье представлены горная степь и широколиственные леса. Высокогорные районы покрыты субальпийскими и альпийскими лугами, выше которых расположены нивальный и гляциальный пояса. В нижней зоне под лесами залегают горные лесные бурые почвы, а выше границы лесов – горно-луговые. Под лесами распространены горные буроземы, на сухих склонах – горностепные почвы. Почвы Прикаспийской низменности – каштановые, луговые, солончаки.

Полевые и лабораторные работы. Экспедиционные работы проведены в полевые сезоны 2024–2025 гг. В семи речных бассейнах заложено 193 площадки (рис. 1), для каждой из которых описаны компоненты ландшафта, выполнен почвенный разрез, отобраны пробы почв и доминирующих видов растений. При выборе площадок учитывалось геологическое строение, ландшафтно-геохимическая позиция, тип природопользования. Пробные площадки закладывались по ландшафтным катенам вдоль и поперек бассейнов рек.

С использованием метода масс-спектрометрии определено валовое содержание следующих 15 элементов: Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Li, Be, Mg, Al, Ca, Sc, V, Cr. В химико-аналитических исследованиях использован масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой PlasmaQuant MS Elite S-NR:11-6000ST043, расположенный на базе научно-образовательного центра коллективного пользования «Спектрометрия

и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ. Пробоподготовка выполнена согласно ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011¹.

Для анализа отобрано 1403 пробы более 60 видов древесных, кустарниковых и травянистых растений. Отбирались различные органы растений: ветки, листья, стебли, кора, цветки. Если растение невозможно было разделить (например, злаковые), то оно отбиралось целиком.

Результаты исследований и их обсуждение

Содержание химических элементов в растениях. Среднее содержание химических элементов в растениях колеблется от 10^5 мкг/г для Са до 10^{-1} мкг/г для Ве (табл. 1). Широкие разбросы значений и стандартных отклонений указывают на сложные и неоднородные условия накопления и рассеивания химических элементов в горных условиях.

Таблица 1 / Table 1

**Содержание химических элементов в растениях бассейнов рек
Каспийского региона, мкг/г /
Content of chemical elements in plants of the Caspian River basins, µg/g**

Химический элемент / The chemical element	Среднее± стандартное отклонение / Average± standard deviation	Максимальное значение / Maximum value	Минимальное значение / Minimum value
Mn	52,2±96,98	687,91	0,03
Fe	172,2±218,95	739,98	7,67
Co	25,3±97,09	968,27	0,01
Ni	558,9±4897,99	97750,7	0,20
Cu	19,8±55,62	483,35	0,05
Zn	25,8±41,01	291,51	0,24
As	4,4±12,77	192,14	0,56
Li	2,6±10,62	187,02	0,06
Be	0,1±0,76	24,59	0,02
Mg	861,8±1389,10	8238,31	1,51
Al	544,1±1224,16	14050,77	3,39
Ca	6102,2±12820,64	99898,8	0,95
Sc	0,4±0,50	2	0,01
V	1,3±2,61	43,97	0,05
Cr	25,5±51,84	998,19	0,09

*Красным выделены три максимальных показателя для каждого элемента, зеленым – три минимальных /
Three maximum indicators for each element are highlighted in red, three minimum indicators – in green.

Преобладающими по содержанию элементами в растениях бассейнов рек Каспийского региона являются биогенные макроэлементы, входящие в состав живого веще-

¹ ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011 Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовых долей металлов в осадках сточных вод, донных отложениях, образцах растительного происхождения спектральными методами. Москва, 2011.

ства – Ca и Mg. Более того, в пределах изучаемых речных бассейнов отмечается накопление Ca в почвах относительно его кларков [Kashirina et al., 2025]. Содержание Mg в ландшафтах увеличивается от высокогорий к аридным низменностям [Дьяченко, 2004]. Эоловое осаждение повышает накопление металлов в растениях [Suska-Malawska et al., 2019].

Остальные рассмотренные химические элементы могут быть токсичными для растений, особенно при высоких концентрациях. Большинство эссенциальных микроэлементов при высоких концентрациях выступают в качестве загрязнителей – тяжелых металлов. К таким элементам относится Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn.

Высокие содержания Co, Ni, Cu и Zn зачастую обусловлены наличием природных геохимических аномалий. Содержание Mn выше в растениях горных районов, что связано с общим дефицитом элемента в щелочной среде аридных ландшафтов.

Al в ландшафтах часто находится в составе комплексных органических соединений и накапливается в гумусе. Элемент относится к условно-эссенциальным микроэлементам, т.е. необходимым живым организмам в небольших количествах и проявляющим токсичность в более высоких концентрациях. При этом подвижность Al сильно зависит от окислительно-восстановительной обстановки: она снижается в сухих щелочных условиях и повышается во влажных кислых [Мирзоева и др., 2024]. К условно-эссенциальным химическим элементам также относится Cr, среднее содержание которого – 25,5 мкг/г.

Такие элементы, как Be, As и Sc, относятся к сильным токсикантам; их содержание в растениях минимально. Низкими концентрациями отличаются и условно-эссенциальные Li и V.

Нахождение Be в окружающей среде связано с природным выщелачиванием горных пород, промышленными выбросами, особенно при сжигании угля [Kumar et al., 2025]. Мышьяк часто входит в состав средств защиты сельскохозяйственных растений от вредителей, что приводит к его накоплению в компонентах агроландшафтов [Nahar et al., 2022; Sinha et al., 2023].

Содержание химических элементов в растениях разных речных бассейнов. При рассмотрении содержания химических элементов в растениях разных речных бассейнов заметны общие закономерности накопления Ca, Mg, Ni и Al (рис. 2).

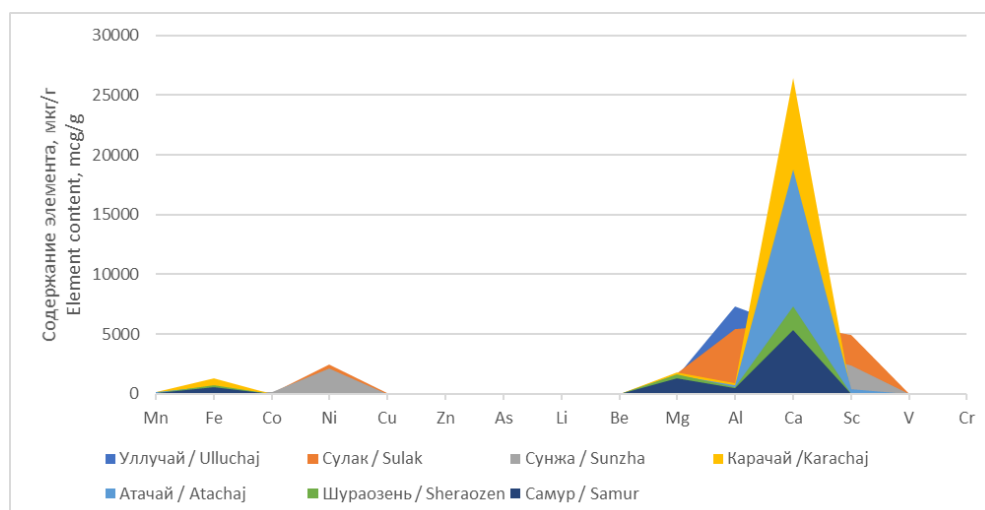


Рис. 2. Содержание химических элементов в растениях разных речных бассейнов /
Fig. 2. Content of chemical elements in plants from different river basins

Содержание Ca достигает максимума в растениях бассейнов рек Карачай и Атачай, расположенных на южном склоне Кавказа. Близкие тенденции накопления, видимо, отражают схожесть природных условий бассейнов и видового состава растений.

Al интенсивно накапливается в растениях бассейнов рек Сулак и Уллучай.

Максимальные показатели содержания Ni отмечены в растениях, отобранных в бассейне смежных рек Северного Кавказа – Сулак и Сунжа. Токсичный Sc также накапливается в растениях бассейнов рек Сулак и Сунжа.

Поглощение химических элементов в зависимости от видового состава и жизненной формы. Поглощение и рассеивание химических элементов растениями различается в зависимости от их видовой принадлежности и жизненной формы. Различия в накоплении элементов разными видами растений во многом обусловлены их филогенетической историей и геохимическими особенностями районов их происхождения [Alekseenko et al., 2020; Wang et al., 2023].

Кальций интенсивно накапливается в растениях семейства бобовые (клевер кавказский – *Trifolium caucasicum*, астрагал козлятниковый – *Astragalus galegiformis*). Заметно повышение содержания Ca в растениях-галофитах (ирис солелюбивый – *Iris halophila*, тамарикс – *Tamarix sp.*). Потенциально токсичные химические элементы накапливаются в различных видах растений (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Накопление некоторых элементов в древесных и кустарниковых растениях бассейнов рек Каспийского региона, мкг/г /
The accumulation of certain elements in woody and shrubby plants in the Caspian River Basin, µg/g**

	Название растения / Plant name	Содержание элементов / The content of the elements						
		Fe	Be	Ca	As	V	Li	Sc
Дерево / Tree	Дуб черешчатый / <i>Quercus robur</i>	641	0,03	3134	1,27	1,46	1,35	1,18
	Берёза Литвинова / <i>Betula litwinowii</i>	2596	0,01	8041	7,60	0,20	0,03	0,52
	Бук восточный / <i>Fagus orientalis</i>	514	0,02	3954	6,57	1,22	0,91	0,75
	Груша кавказская / <i>Pyrus caucasica</i>	828	0,02	5427	1,91	2,02	2,01	0,37
	Лох узколистный / <i>Elaeagnus angustifolia</i>	3043	0,14	4980	1,91	1,23	2,86	0,66
	Рябина кавказская / <i>Sorbus aucuparia</i>	1478	0,01	4623	7,22	0,17	0,33	0,22
	Алыча / <i>Prunus sogdiana</i>	338	0,02	9926	3,74	0,55	1,45	0,94
	Вяз малый / <i>Ulmus minor</i>	399	0,01	32818	0,33	1,61	1,16	0,31
	Граб восточный / <i>Carpinus orientalis</i>	216	0,03	3679	1,16	0,91	0,48	0,35
	Яблоня домашняя / <i>Malus domestica</i>	546	0,13		3,82	0,57	1,29	1,10
	Ива / <i>Salix sp.</i>	197	0,01	9238	5,52	1,18	0,61	0,06
	Клен полевой / <i>Acer campestre</i>	272	0,01	2144	1,57	0,92	2,58	0,64
	Мушмула германская / <i>Mespilus germanica</i>	221	0,02	2004	4,38	0,91	1,03	0,48
	Ольха серая / <i>Alnus incana</i>	32	0,01	1590	0,47	0,34	0,24	0,83
	Сосна обыкновенная / <i>Pinus sylvestris</i>	11	0,01	8780	0,30	0,11	0,11	0,01
	Ясень обыкновенный / <i>Fraxinus excelsior</i>	248	0,02	2373	2,58	1,03	1,79	0,17
	Можжевельник дельтовидный / <i>Juniperus deltoides</i>	512	0,02	2692	2,19	0,70	0,18	0,40
Кустарник / Shrub	Ежевика / <i>Rubus sp.</i>	4064	0,03	1591	1,62	2,12	0,83	0,55
	Бирючина обыкновенная / <i>Ligustrum vulgare</i>	1000	0,03	1161	1,07	1,32	1,18	0,58
	Барбарис обыкновенный / <i>Berberis vulgaris</i>	379	0,02	2302	0,37	3,78	0,88	0,58
	Боярышник / <i>Crataegus sp.</i>	220	0,05	22273	3,16	0,50	1,03	0,54
	Держи-дерево колючее / <i>Paliurus spinachristi</i>	522	0,07	3476	4,77	1,46	1,68	0,37
	Кизил обыкновенный / <i>Cornus mas</i>	154	0,03	1730	1,66	0,81	1,90	0,35
	Лещина обыкновенная / <i>Corylus avellana</i>	175	0,02	7462	2,84	0,82	0,44	0,86
	Малина / <i>Rubus idaeus</i>	12	0,01	6868	3,52	0,46	0,47	0,03
	Рододендрон кавказский / <i>Rhododendron caucasicum</i>	29	0,01	4967	24,06	1,75	0,16	0,01
	Тамарикс / <i>Tamarix sp.</i>	561	0,13	13610	1,65	2,37	1,75	0,41
	Шиповник / <i>Rosa sp.</i>	261	0,02	9277	2,82	0,79	0,44	0,32
	Свидина кроваво-красная / <i>Swida sanguinea</i>	298	0,12	1674	2,36	1,82	2,01	0,17

*Красным выделены три максимальных показателя для каждого элемента /
Three maximum indicators for each element are highlighted in red

Большинство рассматриваемых растений накапливают по одному токсичному элементу. При этом пять видов проявляют тенденции к накоплению двух элементов: тамарикс (*Tamarix* sp.) – Be и V, лох узколистный (*Elaeagnus angustifolia*) – Fe и Be, берёза Литвинова (*Betula litwinowii*) – Fe и As, яблоня домашняя (*Malus domestica*) – Be и Sc, ежевика (*Rubus* sp.) – Fe и V. Тамарикс и лох узколистный отличаются высоким поглощением элементов из среды в условиях аридного климата, что подтверждают исследования других районов [Taghizadeh et al., 2025]. Необходимо отметить, что яблоня и ежевика дают съедобные плоды, что создает угрозы для здоровья.

С точки зрения распределения химических элементов по жизненным формам можно выделить несколько закономерностей. В древесных растениях интенсивнее накапливаются биогенные макроэлементы (Ca, Mg) и некоторые микроэлементы (Mn, Co) (рис. 3).

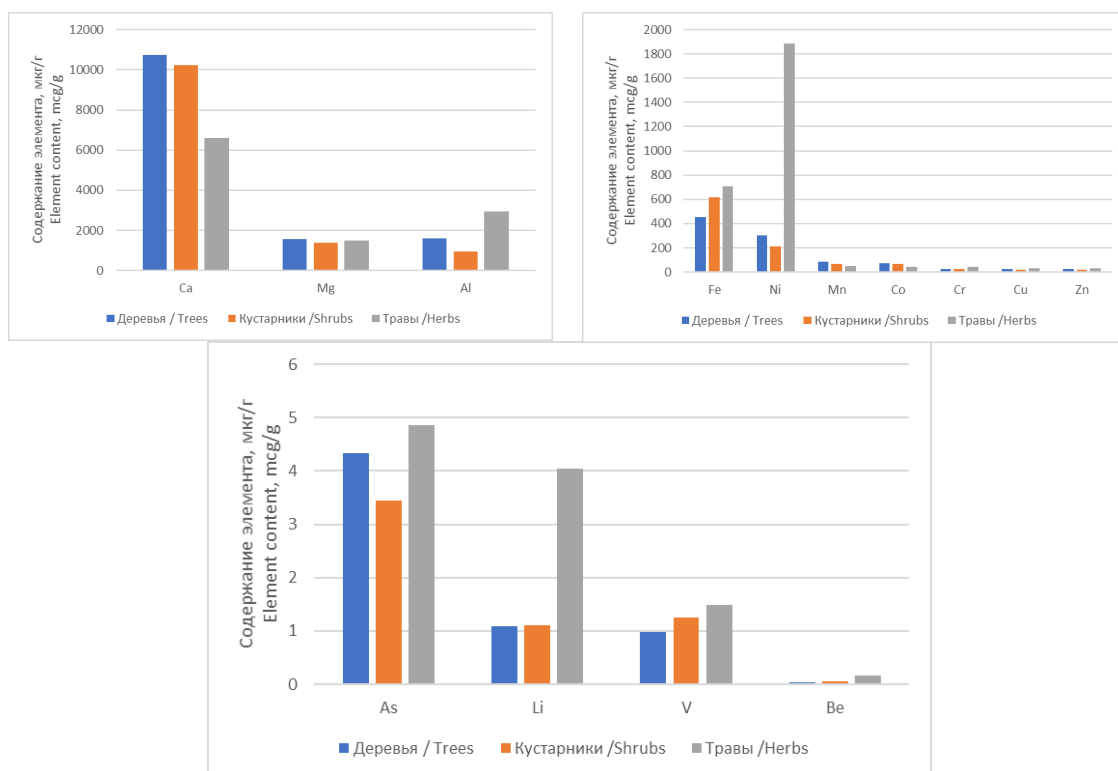


Рис. 3. Содержание потенциально токсичных химических элементов в зависимости от жизненной формы растения /

Fig. 3. Content of potentially toxic chemical elements depending on the plant's life form

Большинство рассматриваемых химических элементов накапливается в травянистых растениях. Так, травы больше накапливают потенциально токсичные Al, Fe, Ni, Cr, Cu, Zn, As, Li, V, Be.

Выводы

1. Преобладающими по содержанию в растениях бассейнов рек Каспийского региона являются биогенные макроэлементы – Ca и Mg. Низкими концентрациями ($10\text{--}10^{-1}$ мкг/г) отличаются условно-эссенциальные и потенциально токсичные Be, As, Sc, Li и V.

Большинство растений накапливает по одному токсичному элементу. Пять видов проявляют тенденции к накоплению двух элементов: тамарикс (*Tamarix* sp.) – Be и V, лох узколистный (*Elaeagnus angustifolia*) – Fe и Be, берёза Литвинова (*Betula litwin-*

owii) – Fe и As, яблоня домашняя (*Malus domestica*) – Be и Sc, ежевика (*Rubus* sp.) – Fe и V.

2. Анализ средних значений содержания химических элементов по жизненным формам показал, что токсичные элементы интенсивнее накапливаются в травянистых растениях.

3. В растениях бассейнов рек Сулак и Сунжа интенсивнее накапливаются потенциально токсичные Ni и Sc, р. Уллучай – Al, рек Карачай и Атачай – биогенный Ca.

Таким образом, полученные данные о содержании потенциально токсичных химических элементов в растениях могут быть использованы для снижения экологического риска для здоровья населения, проживающего в бассейнах горных рек Каспийского региона.

Ограничения исследования связаны с недостаточной плотностью точек, сильным влиянием литологии и локальных ландшафтно-геохимических факторов.

Литература

1. Абакарова А.М., Гитинова П.Ш., Яхияев М.А. Фтористые соединения и тяжелые металлы в почвах и растениях Сулакской дельтовой равнины // Уральский медицинский журнал. – 2020. – № 10 (193). – С. 188–192.
2. Алборов И.Д., Бурдзиева О.Г., Кануков А.С., Архиреева И.Г., Дадтеева Э.В. Подвижность тяжелых металлов в почвах агроландшафтов: факторы, оценка и экологические последствия на примере Садонского свинцово-цинкового комбината // Геология и геофизика Юга России. – 2026. – Т. 16. №1. – С. 168–179. DOI: 10.46698/VNC.2026.24.11.001.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Скифская. Лист К37 (Сочи), К38 (Махачкала), К39. Объяснительная записка / ред. В.А. Лаврищев, А.А. Шейков, В.М. Андреев, В.М. Семенов и др. – СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011. – 431 с.
4. Дроздова И.В., Алексеева-Попова Н.В., Калимова И.Б. Аккумуляция тяжелых металлов в растениях Южного Дагестана в условиях природной геохимической аномалии // Сибирский экологический журнал. – 2015. – Т. 22. №. 6. – С. 920–930.
5. Дьяченко В.В. Геохимия, систематика и оценка состояния ландшафтов Северного Кавказа. – Ростов н/Д.: Комплекс, 2004. – 268 с.
6. Магомедалиев З.Г., Салихов Ш.К., Магомедалиев А.З., Яхияев М.А. Содержание тяжелых металлов в почвах и растениях горных экосистем Дагестана // Проблемы современной науки. – 2014. – № 11-1. – С. 10–17.
7. Мурзаева А.Н., Исаева Н.Г., Чубуркова С.С., Азизова З.А. Исследования содержания солей мышьяка в растительных и животных продуктах // Международная научно-практическая конференция «Развитие научного наследия великого учёного на современном этапе». Т. I. – Махачкала: ДГАУ им. М.М. Джембулатова. – 2021. – С. 274–281.
8. Мирзоева Н.Ю., Проскурнин В.Ю., Кейта И., Диалло А.И.П., Горбунов Р.В., Коротков А.А., Горбунова Т.Ю., Вахрушев М.О., Терещенко Н.Н. Влияет ли добыча полезных ископаемых открытым способом на загрязнение речных экосистем тяжелыми металлами и природным радионуклидом Po-210 (исследования на примере реки Фатала, Гвинейская Республика)? // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. – № 4. – С. 206–217. DOI: 10.46698/VNC.2024.37.37.017.
9. Семенова В.В. Воздействие антропогенного фактора на накопление тяжелых металлов в видах рода *Achillea* L., произрастающих в предгорной зоне Дагестана // Экология урбанизированных территорий. – 2019. – №. 1. – С. 87–92.
10. Семенова В.В., Магомедалиев З.Г. Воздействие транспорта на накопление тяжелых металлов в почвах и растениях рода *Achillea* (Asteraceae) // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки. – 2012. – № 1. – С. 118–122.
11. Семенова В.В., Анатов Д.М. Накопление тяжелых металлов растениями рода *Achillea* L. в засушливых условиях равнинной зоны Дагестана // Аридные экосистемы. – 2022. – № 1(90). – С. 99–106.
12. Alekseenko V.A., Shvydkaya N.V., Alekseenko A.V., Machevariani M.M., Bech J., Pashkevich M.A. et al. Element accumulation patterns of native plant species under the natural geochemical stress // Plants. – 2020. – Vol. 10. No. 1. – Art. No. 33. DOI: 10.3390/plants10010033.

13. Ermakov V.V., Tyutikov S.F., Degtyaryov A.P., Gulyaeva U.A., Danilova V.N. Characteristics of the accumulation of metals by plants and the activity of soil enzymes in metallogenic territories of the Northern Caucasus // *Geochemistry International*. – 2022. – Vol. 60. No. 8. – pp. 772–778. DOI: 10.1134/S0016702922070023.
14. Kashirina E., Gorbunov R., Kerimov I., Gorbunova T., Drygval P., Chuprina E., Nikiforova A., Lineva N., Drygval A., Kelip A. et al. Spatial Distribution of Geochemical Anomalies in Soils of River Basins of the Northeastern Caucasus // *Geosciences*. – 2025. – Vol. 15. – No. 10. – Art. No. 380. DOI: 10.3390/geosciences15100380.
15. Kumar A., Kumar V., Chawla M., Thakur M., Bakshi P., Jasrotia R. et al. Advancements in understanding beryllium contamination: Novel insights into environmental risk assessment // *Land Degradation and Development*. – 2025. – Vol. 36. No. 2. – pp. 350–362. DOI: 10.1002/ldr.5386.
16. Nahar K., Rhaman M.S., Parvin K., Bardhan K., Marques D.N., Garcia-Caparrós P., Hasanuzzaman M. Arsenic-induced oxidative stress and antioxidant defense in plants // *Stresses*. 2022. – Vol. 2(2). – pp. 179–209.
17. Sinha D., Datta S., Mishra R., Agarwal P., Kumari T., Adeyemi S. B. et al. Negative impacts of arsenic on plants and mitigation strategies // *Plants*. – 2023. – Vol. 12. No. 9. – Art. No. 1815. DOI: 10.3390/plants12091815.
18. Suska-Malawska M., Sulwinski M., Wilk M., Otarov A., Metrak M. Potential eolian dust contribution to accumulation of selected heavy metals and rare earth elements in the aboveground biomass of *Tamarix* spp. from saline soils in Kazakhstan // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2019. – Vol. 191. No. 2. – Art. No. 57. DOI: 10.1007/s10661-018-7179-0.
19. Taghizadeh M., Asghari F., Solgi M., Khadivi A. Genotypic variations of *Tamarix aphylla* (L.) H. Karst. population for heavy metal phytoremediation: a case study in Markazi province, Iran // *BMC Plant Biology*. – 2025. – Vol. 25. No. 1. – Art. No. 898. DOI: 10.1186/s12870-025-06940-w.
20. Wang Y., He L., Dong S., Fu H., Wang G., Liang X. et al. Accumulation, translocation, and fractionation of rare earth elements (REEs) in fern species of hyperaccumulators and non-hyperaccumulators growing in urban areas // *Science of The Total Environment*. – 2023. – Vol. 905. – Art. No. 167344. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167344.

References

1. Abakarova A.M., Gitinova P.Sh., Yahiyayev M.A. Fluoride compounds and heavy metals in soils and plants of the Sulak delta plain. *Ural Medical Journal*. 2020. No. 10(193). pp. 188–192. (In Russ.)
2. Alborov I.D., Burdzieva O.G., Kanukov A.S., Arhireeva I.G., Dadteeva E.V. Mobility of heavy metals in agricultural landscape soils: factors, assessment, and environmental consequences using the Sadon lead-zinc plant as a case study. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2026. Vol. 16. No. 1. pp. 168–179. DOI: 10.46698/VNC.2026.24.11.001. (In Russ.)
3. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Series: Scythian. Sheet K37 (Sochi), K38 (Makhachkala), K39. Explanatory note. Eds. V.A. Lavrishchev, A.A. Sheikov, V.M. Andreev, V.M. Semenov et al. Saint Petersburg. VSEGEI Cartographic Factory. 2011. 431 p. (In Russ.)
4. Drozdova I.V., Alekseeva-Popova N.V., Kalimova I.B. Accumulation of heavy metals in plants of Southern Dagestan under conditions of natural geochemical anomaly. *Siberian Ecological Journal*. 2015. Vol. 22. No. 6. pp. 920–930. (In Russ.)
5. Dyachenko V.V. Geochemistry, systematics and assessment of the state of landscapes of the North Caucasus. Rostov-on-Don. Komplex. 2004. 268 p. (In Russ.)
6. Magomedaliev Z.G., Salihov Sh.K., Magomedaliev A.Z., Yahiyayev M.A. The content of heavy metals in soils and plants of mountain ecosystems of Dagestan. *Problems of Modern Science*. 2014. No. 11-1. pp. 10–17. (In Russ.)
7. Murzaeva A.N., Isaeva N.G., Chuburkova S.S., Azizova Z.A. Research on the content of arsenic salts in plant and animal products. Development of the scientific heritage of the great scientist at the present stage. In: International Scientific and Practical Conference Dedicated “Development of the Scientific Legacy of the Great Scientist at the Present Stage.” Makhachkala. Dagestan State Agrarian University named after M.M. Dzhambulatov. 2021. Vol. 1. pp. 274–281. (In Russ.)
8. Mirzoeva N.Yu., Proskurnin V.Yu., Keita I., Diallo A.I.P., Gorbunov R.V., Korotkov A.A., Gorbunova T.Yu., Vakhrushev M.O., Tereshchenko N.N. Does open-pit mining affect the pollution of river ecosystems with heavy metals and the natural radionuclide Po-210 (case study of the Fatala

River, Republic of Guinea)? Geology and Geophysics of Russian South. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 206–217. DOI: 10.46698/VNC.2024.37.37.017. (In Russ.)

9. Semenova V.V. The influence of anthropogenic factors on the accumulation of heavy metals in species of the genus *Achillea* L., growing in the foothill zone of Dagestan. Ecology of urbanized territories. 2019. No. 1. pp. 87–92. (In Russ.)

10. Semenova V.V., Magomedaliyev Z.G. Effects of transport on the accumulation of heavy metals in soils and plants of the genus *Achillea* (*Asteraceae*). Bulletin of Dagestan State University. Series 1: Natural Sciences. 2012. No. 1. pp. 118–122. (In Russ.)

11. Semenova V.V., Anatov D.M. Accumulation of heavy metals by plants of the genus *Achillea* L. in the arid conditions of the lowland zone of Dagestan. Arid Ecosystems. 2022. No. 1(90). pp. 99–106. (In Russ.)

12. Alekseenko V.A., Shvydkaya N.V., Alekseenko A.V., Machevariani M.M., Bech J., Pashkevich M.A. et al. Element accumulation patterns of native plant species under the natural geochemical stress. Plants. 2020. Vol. 10. No. 1. Art. No. 33. DOI: 10.3390/plants10010033.

13. Ermakov V.V., Tyutikov S.F., Degtyaryov A.P., Gulyaeva U.A., Danilova V.N. Characteristics of the accumulation of metals by plants and the activity of soil enzymes in metallogenic territories of the Northern Caucasus. Geochemistry International. 2022. Vol. 60. No. 8. pp. 772–778. DOI: 10.1134/S0016702922070023.

14. Kashirina E., Gorbunov R., Kerimov I., Gorbunova T., Drygval P., Chuprina E., Nikiforova A., Lineva N., Drygval A., Kelip A. et al. Spatial Distribution of Geochemical Anomalies in Soils of River Basins of the Northeastern Caucasus. Geosciences. 2025. Vol. 15. No. 10. Art. No. 380. DOI: 10.3390/geosciences15100380.

15. Kumar A., Kumar V., Chawla M., Thakur M., Bakshi P., Jasrotia R. et al. Advancements in understanding beryllium contamination: Novel insights into environmental risk assessment. Land Degradation and Development. 2025. Vol. 36. No. 2. pp. 350–362. DOI: 10.1002/ldr.5386.

16. Nahar K., Rhaman M.S., Parvin K., Bardhan K., Marques D.N., Garcia-Caparos P., Hasanuzzaman M. Arsenic-induced oxidative stress and antioxidant defense in plants. Stresses. 2022. Vol. 2(2). pp. 179–209.

17. Sinha D., Datta S., Mishra R., Agarwal P., Kumari T., Adeyemi S.B. et al. Negative impacts of arsenic on plants and mitigation strategies. Plants. 2023. Vol. 12. No. 9. Art. No. 1815. DOI: 10.3390/plants12091815.

18. Suska-Malawska M., Sulwinski M., Wilk M., Otarov A., Metrak M. Potential eolian dust contribution to accumulation of selected heavy metals and rare earth elements in the aboveground biomass of *Tamarix* spp. from saline soils in Kazakhstan. Environmental Monitoring and Assessment. 2019. Vol. 191. No. 2. Art. No. 57. DOI: 10.1007/s10661-018-7179-0.

19. Taghizadeh M., Asghari F., Solgi M., Khadivi A. Genotypic variations of *Tamarix aphylla* (L.) H. Karst. population for heavy metal phytoremediation: a case study in Markazi province, Iran. BMC Plant Biology. 2025. Vol. 25. No. 1. Art. No. 898. DOI: 10.1186/s12870-025-06940-w.

20. Wang Y., He L., Dong S., Fu H., Wang G., Liang X. et al. Accumulation, translocation, and fractionation of rare earth elements (REEs) in fern species of hyperaccumulators and non-hyperaccumulators growing in urban areas. Science of The Total Environment. 2023. Vol. 905. Art. No. 167344. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167344.