

УДК 504.453+504.4.054

DOI: 10.46698/VNC.2025.42.19.001

Оригинальная статья

Анализ вероятности метаморфизации ионного состава речных вод в бассейне Кубани

О.С. Решетняк¹, Р.С. Комаров^{1,2}

¹ Южный федеральный университет,
Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40,
e-mail: olgare1@mail.ru;

² Гидрохимический институт, Россия, 344090,
г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 198

Статья поступила: 20.05.2025, доработана: 02.09.2025, принята к публикации: 06.09.2025

Резюме: Актуальность работы. Происходящие изменения на водосборах рек Юга России оказывают влияние на процессы формирования ионного состава воды. В условиях антропогенного воздействия и климатических изменений может происходить метаморфизация ионного состава речных вод. Актуальность и важность изучения этого процесса не вызывает сомнения, поскольку позволяет выявлять источники загрязнения вод и решать региональные проблемы качества водных ресурсов. **Цель работы.** Выявить возможную метаморфизацию ионного состава речных вод в бассейне реки Кубани в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений. **Методы исследования.** Исследование проведено на основе многолетних гидрохимических данных государственной наблюдательной сети Росгидромета (1990–2020 гг.). На основе результатов перевода массовых концентраций в процентные в пересчете на количество вещества эквивалента выполнена классификация ионного состава речных вод. Выявлены региональные особенности ионного состава речных вод в бассейне Кубани и возможная метаморфизация за многолетний период. **Результаты работы.** Впервые для рек бассейна Кубани определены класс, группа и тип природных вод, проведена классификация ионного состава в многолетнем аспекте. Показано, что ионный состав воды по длине реки Кубани характеризуется разнообразием. Наблюдается изменение от наиболее простого состава с доминированием сульфатов и ионов кальция до более сложного – сульфатно-карбонатного класса кальциево-натриевой группы. Более постоянный ионный состав воды характерен для среднего течения реки с преобладанием сульфатов и ионов кальциево-натриевой группы. Основные притоки Кубани имеют однородный состав гидрокарбонатно-кальциевый второго типа (кроме р. Большой Зеленчук). Выделены основные направления метаморфизации ионного состава воды: для одних участков рек метаморфизация происходит в сторону стабилизации ионного состава, а для других – повышения разнообразия (смешанный состав). Метаморфизация речных вод в сторону изменения в анионном составе на отдельных участках Кубани проявляется в повышении доли сульфатов или в переходе к смешанному анионному составу. В большинстве случаев имеет место прямая метаморфизация. Наиболее вероятным последствием данного процесса может стать формирование повышенных или пониженных содержаний отдельных ионов, то есть гидрохимических аномалий.

Ключевые слова: бассейн Кубани, речные воды, ионный состав, метаморфизация природных вод, гидрохимические аномалии.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00366, <https://rscf.ru/project/24-27-00366/>.

Для цитирования: Решетняк О.С., Комаров Р.С. Анализ вероятности метаморфизации ионного состава речных вод в бассейне Кубани. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3): 174–186. DOI: 10.46698/VNC.2025.42.19.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.42.19.001

Original paper

Analysis of the probability of metamorphism of the ionic composition of river waters in the Kuban basin

O.S. Reshetnyak¹, **R.S. Komarov^{1,2}**¹ Southern Federal University, 40 Zorge Str., Rostov-on-Don 344090, Russian Federation, e-mail: olgare1@mail.ru;² Hydrochemical Institute, 198 Stachki Ave., Rostov-on-Don 344090, Russian Federation

Received: 20.05.2025, revised: 02.09.2025, accepted: 06.09.2025

Abstract: Relevance. The ongoing changes in the catchment areas of the rivers of the Russian South affect the processes of formation of the ionic composition of water. Under the conditions of anthropogenic impact and climate change, metamorphism of the ionic composition of river waters can occur. The relevance and importance of studying this process are beyond doubt, since it allows identifying sources of water pollution and solving regional problems of water resource quality. **Aim.** To identify the possible metamorphism of the ionic composition of river waters in the Kuban River basin under the conditions of anthropogenic impact and climate change. **Methods.** The study was carried out on the basis of long-term hydrochemical data of the state observation network of Roshydromet (1990-2020). Based on the results of converting mass concentrations into percentages in terms of the amount of equivalent substance, the ionic composition of river waters has been classified. Regional features of the ionic composition of river waters in the Kuban basin and possible metamorphism over a long-term period have been revealed. **Results.** For the first time, the class, group and type of natural waters have been determined for the rivers of the Kuban basin; the ionic composition has been classified in a long-term aspect. It has been shown that the ionic composition of water along the Kuban River is characterized by diversity. There is a change from the simplest with the dominance of sulfates and calcium ions to a more complex composition – sulfate-carbonate class of the calcium-sodium group. A more constant ionic composition of water in the middle reaches of the river with a predominance of sulfates and ions of the calcium-sodium group. The main tributaries of the Kuban have a homogeneous composition – hydrocarbonate-calcium of the second type (except for the Bolshoy Zelenchuk River). The main directions of metamorphization of the ionic composition of water are identified: for some sections of rivers, metamorphization occurs in the direction of stabilization of the ionic composition, and for others – diversity (mixed composition). Metamorphization of river waters in the direction of change in the anionic composition in certain sections of Kuban is manifested in an increase in the proportion of sulfates or in the transition to a mixed anionic composition. In most cases, direct metamorphization takes place. The most probable consequence of this process may be the formation of increased or decreased contents of individual ions, i.e. hydrochemical anomalies.

Keywords: Kuban basin, river waters, ionic composition, metamorphism of natural waters, hydrochemical anomalies.

Acknowledgements: The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation № 24-27-00366, <https://rscf.ru/project/24-27-00366/>.

For citation: Reshetnyak O.S., Komarov R.S. Analysis of the probability of metamorphism of the ionic composition of river waters in the Kuban basin. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 174-186. DOI: 10.46698/VNC.2025.42.19.001

Введение

На водосборах крупных рек европейской части России под влиянием антропогенной деятельности и изменений климата в последние десятилетия уже произошли существенные изменения в водных экосистемах. Многолетняя интенсивная хозяйственная деятельность привела к истощению водных ресурсов, особенно в южных районах России, а поступление широкого спектра органических и неорганических веществ в речные экосистемы может привести к техногенной трансформации химического состава воды и ухудшению ее качества [Никаноров, Брызгалов, 2006; Диффузное загрязнение ..., 2020].

Аналогичные процессы происходят на водосборах рек по всему миру, где под воздействием естественных и техногенных факторов наблюдаются существенные изменения химического состава воды, ионного стока рек, нарушаются естественные «солевые циклы», что обуславливает засоление пресных вод [Kaushal et al., 2023; Wu et al., 2021], изменяются естественные процессы выветривания горных пород [Lechuga-Crespo et al., 2020; Liu, Han, 2020], увеличивается вынос веществ с речным стоком вследствие климатических изменений [Gong et al., 2023]. В работе [Wang et al., 2025] показано, что выветривание карбонатов и силикатов является основным контролирующим фактором для процесса эволюции (метаморфизации) поверхностных вод. Сильное испарение приводит к значительным различиям в концентрациях ионов, что проявляется как низкими содержаниями ионов в водах в горных районах, так и высокими – в равнинных районах. И все эти процессы способствуют метаморфизации природных вод.

Как было показано ранее [Даниленко и др., 2020; Решетняк, 2023], одной из предпосылок метаморфизации природных (речных) вод является активная хозяйственная деятельность на водосборе, приводящая к значительным изменениям в ионном составе воды. Может происходить увеличение минерализации воды (для южных рек за счет испарения, для северных – за счет сброса сточных вод предприятий и т.п.), смещение показателя кислотности воды, изменение соотношения ионов в воде за счет повышения содержания отдельных компонентов и др. Таким образом, происходит метаморфизация природных вод, которая характеризуется устойчивыми изменениями в химическом составе воды.

Изначально процесс метаморфизации рассматривался как природный процесс «направленного изменения химического состава воды под действием физико-географических условий» [Никаноров, 2008]. Однако в современных условиях антропогенного воздействия наблюдается усиление процессов техногенной метаморфизации природных вод (в том числе и поверхностных, речных и др.), что детально рассмотрено в работах Е. П. Янина на примере рек европейской части России и в других исследованиях [Янин, 1983, 2006; Мукашева, Лопарева, 2013; Даниленко и др., 2020]. С наибольшей вероятностью процесс природной метаморфизации воды будет протекать в зонах с засушливым климатом, а техногенной метаморфизации – в высокоурбанизированных районах с развитой промышленностью и сельскохозяйственным производством.

Техногенная метаморфизация речных вод чаще всего связана с полным преобразованием гидрохимического режима в части изменения соотношения главных ионов, увеличения содержания биогенных элементов, органического вещества и усиления процесса эвтрофирования водоема, а также с появлением в воде ксенобиотиков, значительно ухудшающих качество воды [Янин, 2006]. При значительных изменениях в химическом составе воды происходит преобразование и донных от-

ложений, формируются так называемые «техногенные илы», обогащенные различными металлами [Янин, 2006; Закруткин, Решетняк, 2023], что соответственно в целом ухудшает экологическое состояние водных экосистем и усиливает экологические риски [Teranosyan et al., 2024].

В работе [Андрулиони и др., 2022] на примере реки Сырдарьи показано, что происходит рост концентрации сульфатов и трансформация стока, а наблюдаемая «метаморфизация ионного состава вод отдельных водоемов продолжается до настоящего времени и влечет за собой изменения физических свойств воды, таких как плотность, соленость».

Основным антропогенным фактором, вызывающим процесс метаморфизации природных вод в южных регионах (в бассейне оз. Балхаш, Малого Арала, рек Сырдарьи и Илека), является орошаемое земледелие и поступление возвратных вод с полей орошения [Мукашева, Лопарева, 2013]. Здесь происходит наложение природных факторов, способствующих засолению речных вод (повышенное испарение воды, жаркий климат), и антропогенной деятельности человека.

Антропогенные изменения влияют не только на состав воды, они воздействуют в целом на речные ландшафты в различных масштабах, что, в свою очередь, влияет на режим речного стока и качество воды, снижая экосистемные функции речных систем [Ekka et al., 2020].

Таким образом, представленные выше примеры обуславливают актуальность и важность изучения процесса метаморфизации природных вод. Необходимо не только знать источники загрязнения природных вод, но и понимать процессы, протекающие в водной среде (такие, как обменная адсорбция, реакции осаждения и кристаллизации, окислительно-восстановительные реакции, смешение вод разного состава и др.). Это позволит решать не только региональные проблемы трансформации состава природных вод и качества воды рек, но и рассматривать глобальные геохимические потоки и закономерности формирования ионного состава природных вод.

В данном контексте особенно актуальной является **цель нашего исследования** – выявить возможную метаморфизацию ионного состава речных вод в бассейне Кубани в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений за многолетний период.

Материалы и методы исследования

Исследование проведено на основе анализа и обобщения многолетних гидрохимических данных (1990–2020 гг.) Государственной наблюдательной сети (ГНС) Росгидромета, характеризующих содержание макрокомпонентов в воде рек бассейна Кубани (главных ионов: хлоридов, сульфатов, гидрокарбонатов, ионов кальция, магния, суммы ионов натрия и калия) (<https://gidrohim.com>). Авторами выполнены сбор и анализ первичных данных, перевод массовых концентраций в процентные в пересчете на количество вещества эквивалента для каждого иона и далее полученная информация проанализирована.

Объекты исследования: речные участки по длине реки Кубани в пунктах наблюдений: г. Невинномысск, г. Армавир, г. Кропоткин, ст-ца Ладожская, г. Краснодар, х. Тиховский, а также отдельные участки основных притоков Кубани: р. Большой Зеленчук – выше г. Невинномысск; р. Лаба – г. Лабинск, х. Догужиев; р. Белая – п. Гузерипль, г. Майкоп, а. Адамий; р. Пшеха – г. Апшеронск; р. Пшиш – г. Хадыженск, х. Фокин; р. Псекупс – г. Горячий Ключ; р. Афипис – ст-ца Смоленская; р. Абин –

г. Абинск; р. Адагум – г. Крымск. На некоторых пунктах наблюдений были рассмотрены створы выше и ниже города. Таким образом, в исследовании использованы данные по 19 пунктам наблюдений (по 23 створам) на 10 реках бассейна Кубани (рис. 1).

Разработка картосхем осуществлялась с помощью свободно распространяемой геоинформационной системы QGIS 3.10 (по наборам данных OpenStreetMap и Shuttle Radar Topography Mission) и компьютерной программы для редактирования пространственных данных SAGA GIS 2.3.2.

Методика исследования

Для оценки возможной (природной или техногенной) метаморфизации ионного состава речных вод необходимо провести классификацию ионного состава воды по классификации О.А. Алекина. В основе классификации лежат два принципа: о доминировании ионов в составе воды и учет соотношения ионов [Алекин, 1970].

Для исследуемых участков рек бассейна Кубани выполнен перевод всех значенных массовых концентраций в процентные в пересчете на количество вещества эквивалента для каждого иона за каждый год многолетнего периода. Далее определен класс (по доминирующему аниону), группа (по доминирующему катиону) и тип природных вод (по соотношению ионов) за каждый год периода исследования и за определенные периоды. На основе полученных данных классификации ионного состава речных вод определяется направленность процесса метаморфизации или стабильность ионного состава воды.

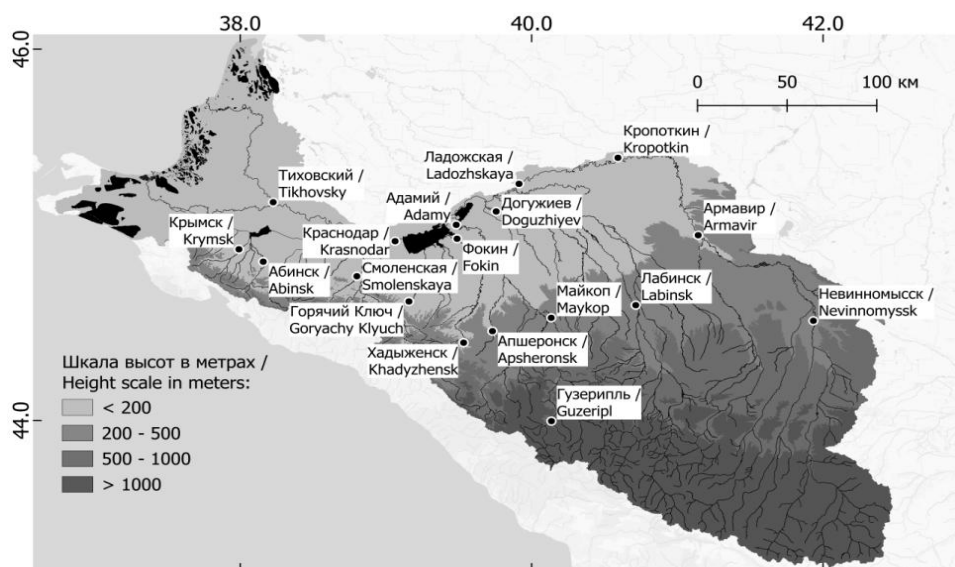


Рис. 1. Расположение пунктов наблюдений и участков в бассейне Кубани (составлено авторами) /

Fig. 1. Location of observation points and sites in the Kuban basin (compiled by the authors)

Гипотеза нашего исследования заключалась в следующем: при отсутствии значимого антропогенного воздействия не должно наблюдаться значительных изменений в ионном составе воды (то есть не меняется класс, группа и тип речных вод в бассейне Кубани). При устойчивых изменениях в ионном составе воды рек в многолетнем аспекте можно говорить о наличии метаморфизации [Решетняк, 2023]. При этом установление характера метаморфизации – природная или техногенная – требует дополнительных исследований.

Результаты и их обсуждение

В пределах речного бассейна Кубани абсолютные значения ионного стока изменяются в широких пределах (до 4673 тыс. т/год), достигая наибольших значений в нижнем течении Кубани, Лабы и Белой [Комаров, Решетняк, 2024]. В пространственном распределении ионного стока выявлена неоднородность интенсивности выноса ионов в пределах водосбора р. Кубани, обусловленная совокупным влиянием природных и техногенных факторов.

В динамике для исследуемых участков рек в многолетнем аспекте формируется убывающий тренд изменчивости ионного стока, но статистически значимыми тенденциями характеризуются только отдельные участки рек (р. Кубань – г. Краснодар, рук. Протока – г. Славянск-на-Кубани, рук. Протока – х. Слободка, р. Пишиш – г. Хадыженск и р. Псекупс – г. Горячий Ключ).

Обобщенная характеристика ионного состава воды по классификации О. А. Алекаина для участков по длине реки Кубани представлена в таблице 1, для участков изучаемых основных притоков Кубани – в таблице 2.

Таблица 1 / Table 1

**Классификация ионного состава воды по длине реки Кубани
(обобщение за 1990–2020 гг.) /
Classification of the ionic composition of water along the length of the Kuban River
(summary for 1990–2020)**

№	Пункт наблюдений / Observation point	Створ / Site	Класс / Class	Группа / Group	Тип / Type
1	г. Невинномысск / Nevinnomyssk	выше города / above the city	S (55 %)*	Ca (65 %)	II (87 %)
			SC (36 %)	CaNa (23 %)	
		ниже города / below the city	S (87 %)	CaNa (52 %)	II (97 %)
				Ca (36 %)	
2	г. Армавир / Armavir	выше города / above the city	S (97 %)	NaCa (32 %)	II (100 %)
				CaNa (29 %)	
		ниже города / below the city	S (97 %)	CaNa (52 %)	II (97 %)
				Ca (32 %)	
3	г. Кропоткин / Kropotkin	выше города / above the city	S (100 %)	CaNa (48 %)	II (97 %)
				Ca (26 %)	
		ниже города / below the city	S (100 %)	CaNa (48 %)	II (100 %)
				NaCa (26 %)	
4	ст-ца Ладожская / Ladozhskaya	в черте ст-цы / within the village	S (100 %)	CaNa (42 %)	II (100 %)
				Ca и NaCa (по 23 %)	
5	г. Краснодар / Krasnodar	выше города / above the city	CS (42 %)	Ca (100 %)	II (97 %)
			C (32 %)		
		ниже города / below the city	CS (61 %)	Ca (97 %)	II (97 %)
			C (36 %)		
6	х. Тиховский / Tikhovsky	в черте хут. / within the village	SC (68 %)	Na (45 %)	II (97 %)
			CS и S (по 16 %)	Ca (23 %)	

Примечания: С – карбонатный, S – сульфатный, SC – сульфатно-карбонатный, CS – карбонатно-сульфатный класс; Ca – кальциевая, Na – натриевая, CaNa – кальциево-натриевая, NaCa – натриево-кальциевая группа; II – второй тип; *частота встречаемости показателя (класс, группа, тип) за период исследования. / Note: C – carbonate, S – sulfate, SC – sulfate-carbonate, CS – carbonate-sulfate class; Ca – calcium, Na – sodium, CaNa – calcium-sodium, NaCa – sodium-calcium group; II – the second type; *frequency of occurrence of the indicator (class, group, type) for the period research.

Анализ данных таблицы 1 показал, что ионный состав воды на исследуемых участках по длине реки Кубани характеризуется разнообразием. Состав изменяется от наиболее простого S_{Ca} – сульфатный класс кальциевая группа (в отдельные годы на участках у гг. Армавир, Кропоткин и др.) до более сложных составов SC_{CaNa} – сульфатно-карбонатный класс кальциево-натриевая группа (в районе г. Невинномысска). В целом же, можно отметить, что более постоянный ионный состав воды в среднем течении реки и соответствует он сульфатному классу кальциево-натриевой группы (S_{CaNa}). Тип речных вод (II) по соотношению концентраций катионов и анионов постоянен на протяжении всего течения Кубани.

В отличие от разнообразия ионного состава воды основной реки притоки имеют однородный состав гидрокарбонатно-кальциевый второго типа. Исключение составляет р. Большой Зеленчук, где более существенно содержание сульфатов в воде (табл. 2). Это связано, с развитием карста (и вымыванием гипса и известняков) в верхнем и среднем течении реки.

Таблица 2 / Table 2

**Классификация ионного состава воды притоков Кубани (обобщение за 1990–2020 гг.) /
Classification of the ionic composition of water in the tributaries of the Kuban
(summary for 1990–2020)**

№	Приток / Tributary	Пункт наблюдений / Observation point	Класс / Class	Группа / Group	Тип / Type
1	р. Большой Зеленчук / Bolshoy Zelenchuk River	г. Невинномысск / Nevinnomyssk	SC (42 %)* CS (29 %)	Ca (90 %)	II (97 %)
2	р. Лаба / Laba River	г. Лабинск / Labinsk	C (97 %)	Ca (100 %)	II (97 %)
3	р. Лаба / Laba River	х. Догужиев / Doguzhiyev	C (100 %)	Ca (100 %)	II (84 %)
4	р. Белая / Belaya River	п. Гузерипль / Guzeripl	C (100 %)	Ca (100 %)	II (65 %)
5	р. Белая / Belaya River	г. Майкоп / Maykop	C (100 %)	Ca (100 %)	II (77 %)
6	р. Белая / Belaya River	а. Адамий / Adamy	C (100 %)	Ca (100 %)	II (81 %)
7	р. Пшеха / Pshekha River	г. Апшеронск / Apsheronensk	C (100 %)	Ca (100 %)	II (68 %)
8	р. Пшиш / Pshish River	г. Хадыженск / Khadyzhensk	C (100 %)	Ca (100 %)	II (87 %)
9	р. Пшиш / Pshish River	х. Фокин / Fokin	C (100 %)	Ca (100 %)	II (65 %)
10	р. Псекупс / Psekups River	г. Горячий Ключ / Goryachy Klyuch	C (100 %)	Ca (100 %)	II (74 %)
11	р. Афипс / Afips River	ст-ца Смоленская / Smolenskaya	C (100 %)	Ca (100 %)	II (77 %)
12	р. Абин / Abin River	г. Абинск / Abinsk	C (100 %)	Ca (100 %)	II (52 %) III (26 %)
13	р. Адагум / Adagum River	г. Крымск / Krymsk	C (100 %)	Ca (100 %)	II (74 %)

Примечания: C – карбонатный, SC – сульфатно-карбонатный, CS – карбонатно-сульфатный класс; Ca – кальциевая группа; II – второй тип; *частота встречаемости показателя (класс, группа, тип) за период исследования. / Note: C – carbonate, SC – sulfate-carbonate, SS – carbonate-sulfate class; Ca – calcium, II – the second type; *frequency of occurrence of the indicator (class, group, type) for the period research.

Анализируя данные таблиц 1 и 2 можно ожидать, что в период с 1990 по 2020 гг. произошла метаморфизация ионного состава воды на следующих участках:

- в районе г. Невинномысска и х. Тиховского возможно была перестройка катионного и анионного состава речной воды;
- в пунктах наблюдений г. Армавира, г. Кропоткина и ст-цы Ладужской возможно была метаморфизация только катионного состава воды;
- в районе г. Краснодара и на участке притока р. Большой Зеленчук (выше г. Невинномысска) возможно были изменения в анионном составе воды.

Доказать или опровергнуть высказанные предположения можно на основе детального изучения изменчивости ионного состава на данных участках рек.

Стоит отметить, что из большого количества исследуемых участков рек бассейна Кубани (всего проанализированы данные по 23 створам, т.е. изучены 23 участка реки) всего на 6-ти из них выявлена вероятность метаморфизации ионного состава воды за многолетний период. Это составило 26 % в целом для бассейна, что можно считать допустимым.

Как было показано ранее [Решетняк, 2023] выявление метаморфизации ионного состава речных вод основывается на следующих положениях.

1. Возможны так называемые прямая (переход от гидрокарбонатного к сульфатному и далее к хлоридному классу) и обратная метаморфизация ионного состава воды, что объясняется растворимостью солей в природных водах.

2. Протеканию прямой метаморфизации способствуют процессы усиления аридизации климата, повышение миграционной активности ионов кальция, рост минерализации воды, а процессу обратной метаморфизации – увеличение количества атмосферных осадков и влажный климат (то есть факторы, способствующие усилению рассоления дренируемых горных пород), снижение минерализации и возрастание карбонатности воды [Никаноров, 2008].

3. Если в определенный период более чем в 50 % рассматриваемых лет вода характеризуется определенным классом и группой, то и ионный состав за весь этот период можно охарактеризовать данными классом и группой. Если доминирующий класс и группу не удастся выделить, то ионный состав рассматривается как смешанный [Решетняк, 2023].

С учетом этих положений и анализа изменчивости ионного состава воды за многолетний период можно выявить направленность метаморфизации природных вод (устойчивые тенденции смены класса, группы или типа) или ее отсутствие (стабильность ионного состава воды рек).

Для этого сначала установлены периоды, в которые можно выделить постоянные характеристики (класс и группу) природных вод, и проведено сравнение особенностей ионного состава воды исследуемых участков рек бассейна Кубани за выделенные условные периоды. Результаты сравнительного анализа приведены в таблице 3.

Анализируя выделенные особенности метаморфизации (табл. 3) ионного состава воды рек можно выделить основные тенденции, по которым протекает этот процесс. Для одних участков рек метаморфизация происходит в сторону стабилизации (постоянства) ионного состава, а для других – разнообразия (смешанный состав, без явного доминирования ионов). Так, например, на участках реки Кубани (г. Невинномысск (выше города), ст-ца Ладужская и х. Тиховский) отмечается стабилизация катионного состава с тенденцией выхода на доминирующее положение ионов кальция или натрия. При этом смена доминирующего катиона с кальция на натрий на участке Кубани у х. Тиховского является подтверждением протекающих процессов засоления водосборной территории в нижнем течении реки на фоне климатических изменений.

Для других участков, таких как р. Кубань – г. Краснодар (выше города) и р. Большой Зеленчук – г. Невинномысск (выше города), стабилизация происходит в анионном составе воды. Наблюдается метаморфизация с разнообразного анионного состава на постоянный: в первом случае идет смена доминирующего аниона на гидрокарбонат (С (50 %), СS (44 %)), а во втором – на сульфаты и гидрокарбонаты (SC (75 %)) (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

Характеристика метаморфизации ионного состава воды на участках рек бассейна Кубани / Characteristics of metamorphism of ionic composition of water in sections of rivers of the Kuban basin

№	Исследуемый участок реки / The research site on the river	Периоды (годы) / Periods (years)					
		1990–2000	2001–2002	2003–2005	2006–2007	2008–2012	2013–2020
1	р. Кубань – г. Невинномысск (выше города) / Kuban River – Nevinnomyssk (above the city)	Постоянство анионного состава: S (100 %) / Constancy of anionic composition: S (100 %)	Разнообразие анионного состава: SC (55 %)+C+S / Diversity of anionic composition: SC (55 %)+C+S				
		Разнообразие катионного состава: Ca (52 %)+CaNa+CaMg / Diversity of cationic composition: Ca (52 %)+CaNa+CaMg			Постоянство состава: Ca (100 %) / Constancy of composition: Ca (100 %)		
2	р. Кубань – г. Армавир (ниже города) / Kuban River – Armavir (below the city)	Постоянство катионного состава: CaNa (67 %) / Constancy of cationic composition: CaNa (67 %)			Разнообразие катионного состава: Ca (54 %)+CaNa (31 %) / Diversity of cationic composition: Ca (54 %)+CaNa (31 %)		
3	р. Кубань – ст-ца Ладожская / Kuban River – Ladozhskaya	Разнообразие катионного состава: NaCa (39 %)+CaNa (28 %) / Diversity of cationic composition: NaCa (39 %)+ CaNa (28 %)			Постоянство катионного состава: CaNa (62 %) / Constancy of cationic composition: CaNa (62 %)		
4	р. Кубань – г. Краснодар (выше города) / Kuban River – Krasnodar (above the city)	Разнообразие анионного состава: SC (46 %), CS (38 %) / Diversity of anionic composition: SC (46 %), CS (38 %)		Смена доминирующего аниона на гидрокарбонат: C (50 %), CS (44 %) / Change of dominant anion to bicarbonate: C (50 %), CS (44 %)			
5	р. Кубань – х. Тиховский (в черте хут.) / Kuban River – Tikhovsky (within the village)	Постоянство анионного состава: SC (75 %) / Constancy of anionic composition: SC (75 %)			Разнообразие: S (57 %)+SC (43 %) / Diversity: S (57 %)+ SC (43 %)		
		Разнообразие катионного состава: Ca (44 %)+CaNa (37 %) / Diversity of cationic composition: Ca (44 %)+CaNa (37 %)		Смена доминирующего катиона и постоянство состава: Na (93 %) / Change of the dominant cation and constancy of composition: Na (93 %)			
6	р. Большой Зеленчук – г. Невинномысск (выше города) / Bolshoy Zelenchuk River – Nevinnomyssk (above the city)	Разнообразие анионного состава: S (30 %), SC (30 %), CS (30 %) / Diversity of anionic composition: S (30 %), SC (30 %), CS (30 %)			Постоянство анионного состава: SC (75 %) / Constancy of anionic composition: SC (75 %)		

В качестве примера метаморфизации ионного состава в сторону формирования смешанного состава воды можно привести изменения в анионном составе на участках Кубани выше г. Невинномыска и у х. Тиховского. Здесь произошла трансформация состава воды, который ранее характеризовался доминированием сульфатов (75–100 %), в сторону разнообразия анионного состава.

Если проанализировать выделенные для каждого речного участка периоды и «переходные» годы, в которые воды характеризуются различными ионными составами, то можно отметить совпадение границ периодов 2012–2013 гг. в 3-х случаях и 2007–2008 гг. – в 2-х случаях. Таким образом, период с 2007 по 2012 годы можно назвать переходным в целом для водосборной территории, после которого окончательно произошла метаморфизация ионного состава речных вод на отдельных участках в бассейне Кубани. Этот период совпадает с началом длительного маловодного периода, который сейчас наблюдается для многих водосборов Юга европейской части России, в том числе и для бассейна Кубани.

В большинстве случаев имеет место прямая метаморфизация (переход от карбонатного класса к сульфатному), но на участке выше г. Краснодара происходит снижение разнообразия анионного состава, смена доминирующего аниона на гидрокарбонат, то есть идет переход от сульфатного класса к гидрокарбонатному (табл. 3). Скорее всего, такой процесс вызван влиянием Краснодарского водохранилища, за счет которого создается более влажный микроклимат, идет боковая проточность воды и усиливается вымывание карбонатных минералов из дренируемых пород.

Процесс техногенной метаморфизации речных вод обуславливает не только нарушение гидрохимического режима и засоление водных объектов, но и приводит к формированию техногенных илов [Янин, 2006] и гидрохимических аномалий, техногенных гидрохимических потоков в природных водах [Макаров, 2024].

Для уязвимых арктических экосистем даже незначительные изменения в ионном составе способствуют формированию аномальных концентраций, в том числе и по содержанию в воде сульфатов, гидрокарбонатов, реже ионов кальция и магния. Например, наличие гидрохимических аномалий по содержанию сульфатов в воде отдельных рек Кольского полуострова является подтверждением техногенной природы метаморфизации ионного состава воды этих рек, водосборы которых расположены в зоне влияния предприятий горно-металлургического комплекса. Для водосборов южных рек таких данных пока не установлено, что также определяет важность наших дальнейших исследований данной проблемы.

Выводы

На основе проведенного исследования получены следующие результаты.

1. Ионный состав воды по длине реки Кубани характеризуется разнообразием и изменяется от наиболее простого S_{Ca} – сульфатный класс кальциевая группа (на участках у гг. Армавира, Кропоткина и др.) до более сложных составов SC_{CaNa} – сульфатно-карбонатный класс кальциево-натриевая группа (г. Невинномысск). Более постоянный ионный состав воды характерен для среднего течения реки – сульфатный класс кальциево-натриевая группа II тип. Основные притоки Кубани имеют однородный состав гидрокарбонатно-кальциевый второго типа. Исключение составляет р. Большой Зеленчук, где более существенно содержание сульфатов в воде.

2. Впервые выделены основные направления метаморфизации ионного состава воды в бассейне Кубани: для одних участков рек метаморфизация происходит в сторону стабилизации ионного состава, а для других – разнообразия (формируется смешанный состав без явного доминирования ионов). Показано, что смена доминирующего катиона с кальция на натрий на участке р. Кубани у х. Тиховского является подтверждением процесса засоления водосборной территории в нижнем течении реки на фоне климатических изменений.

3. Метаморфизация речных вод в сторону изменения в анионном составе на отдельных участках Кубани проявляется в повышении доли сульфатов до 75–100 % или в переходе к смешанному анионному составу. В большинстве случаев имеет место прямая метаморфизация, то есть переход от карбонатного класса к сульфатному. На участке реки выше г. Краснодара происходит обратный процесс возрастания доминирования гидрокарбонатов, что, скорее всего, связано с влиянием Краснодарского водохранилища.

4. Процесс метаморфизации речных вод в сторону доминирования сульфатов может стать причиной формирования гидрохимических аномалий в воде по данному компоненту.

Результаты проведенных исследований могут быть в дальнейшем использованы при изучении гидролого-гидрохимических особенностей функционирования речных систем в бассейне Кубани, для оценки последствий хозяйственной деятельности на водосборе, что позволит повысить информативность оценки качества воды рек бассейна Кубани с учетом региональных особенностей ионного состава воды и возможных тенденций его трансформации.

Литература

1. Алекин О.А. Основы гидрохимии: учебное пособие. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 442 с.
2. Андрулиони Н.Ю., Завьялов П.О., Ижицкий А.С. Современная эволюция солевого состава остаточных бассейнов Аральского моря. // *Океанология*. – 2022. – Т. 62. № 1. – С. 1–17.
3. Даниленко А.О., Косменко Л.С., Решетняк О.С., Кондакова М.Ю. Предпосылки техногенной метаморфизации ионного состава воды р. Надым в условиях глобальных климатических изменений. // *Известия РАН. Серия Географическая*. – 2020. – № 1. – С. 127–137. DOI: 10.31857/S2587556620010069.
4. Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения. Коллективная монография под рук. В.И. Данилова-Данильяна. – М.: РАН, 2020. – 512 с.
5. Закруткин В.Е., Решетняк В.Н. Распределение железа и его минералов в речных отложениях Восточного Донбасса. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 85–98.
6. Комаров Р.С., Решетняк О.С. Пространственно-временная изменчивость ионного стока в бассейне р. Кубани. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2024. – Т. 14. № 3. – С. 191–203. DOI: 10.46698/q4491-7472-5566-w.
7. Макаров В.Н. Формирование техногенных гидрохимических потоков при разработке месторождений олова в арктических районах Якутии. // *Арктика: экология и экономика*. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 549–561. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-549-561.
8. Мукашева А.С., Лопарева Т.Я. Генетическая однородность ионно-солевого состава воды Балхаш-Илейского и Арало-Сырдарьинского бассейнов. // *Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство*. – 2013. – № 2. – С. 111–115.
9. Никаноров А.М. Гидрохимия: Учебник. изд. 3-е, дополненное. – Ростов-на-Дону: «НОК», 2008. – 461 с.

10. Никаноров А.М., Брызгалов В.А. Пресноводные экосистемы в импактных районах России. – Ростов-на-Дону: «НОК», 2006. – 275 с.
11. Решетняк О.С. Анализ вероятности метаморфизации ионного состава ультрапресных вод арктических рек России. // Арктика: экология и экономика. – 2023. – Т. 14. № 3. – С. 437–448. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-3-437-448.
12. Янин Е.П. Изменение химического состава и техногенная метаморфизация речных вод в промышленно-урбанизированных районах. // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. – 2006. – № 3. – С. 2–27.
13. Янин Е.П. Основные тенденции изменения геохимических черт водотоков и водоемов в антропогенных ландшафтах. // Динамика географических систем. – М.: Изд-во МГУ, 1983. – С. 13–14.
14. Ekka A., Pande S., Jiang Y., Zaag P. Anthropogenic modifications and river ecosystem services: A landscape perspective. // Water. – 2020. – Vol. 12. Art. No. 2706. DOI: 10.3390/w12102706.
15. Gong S., Bai X., Luo G., Li C., Wu L., Chen F., Ran C., Xi H., Zhang S. Climate change has enhanced the positive contribution of rock weathering to the major ions in riverine transport. // Global and Planetary Change. – 2023. – Vol. 228. Art. No. 104203. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2023.104203.
16. Kaushal S.S., Likens G.E., Mayer P.M., Shatkay R.R., Shelton S.A., Grant S.B. et al. The anthropogenic salt cycle. // Nature Reviews Earth & Environment. – 2023. – Vol. 4. – pp. 770–784. DOI: 10.1038/s43017-023-00485-y.
17. Lechuga-Crespo J.L., Sanchez-Perez J.M., Sauvage S., Hartmann J., Amiotte Suchet P., Probst J. L., Ruiz-Romera E. A model for evaluating continental chemical weathering from riverine transports of dissolved major elements at a global scale. // Global and Planetary Change. – 2020. – Vol. 192. Art. No. 103226. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2020.103226.
18. Liu J., Han G. Major ions and $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ in Jiulongjiang River water: Investigating the relationships between natural chemical weathering and human perturbations. // Science of the Total Environment. – 2020. – Vol. 724. Art. No. 138208. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138208.
19. Tepanosyan G., Poghosyan Z., Sahakyan L. Geochemical characterization of changes in the chemical composition of river sediments under the continuous anthropogenic influence of Yerevan, Armenia. // Environmental Pollution. – 2024. – Vol. 359. Art. No. 124553.
20. Wang H., Wu S., Xu J., Zhang L., Li K., Li J., Shu H. and Chu J. Study on the surface water chemical composition and water quality pollution characteristics of the Shiyang River Basin, China. // Hydrology. – 2025. – Vol. 12. Issue 6. Art. No. 132. DOI: 10.3390/hydrology12060132.
21. Wu J., Xu N., Wang, Y., Zhang W., Borthwick Alistair G.L., Ni J. Global syndromes induced by changes in solutes of the world's large rivers. // Nature Communications. – 2021. – Vol. 12. Art. No. 5940. DOI: 10.1038/s41467-021-26231-w.

References

1. Alekin O. A. Fundamentals of hydrochemistry: a textbook. Leningrad. Gidrometeoizdat. 1970. 442 p. (In Russ)
2. Andrulioni N.Yu., Zavyalov P.O., Izhitsky A.S. Modern evolution of the salt composition of the residual basins of the Aral Sea. Oceanology. 2022. Vol. 62. No.1. pp. 1–17. (In Russ)
3. Danilenko A.O., Kosmenko L.S., Reshetnyak O.S., Kondakova M.Yu. Prerequisites for technogenic metamorphism of the ionic composition of the Nadym River water under global climate change. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series. 2020. No. 1. pp. 127–137. DOI: 10.31857/S2587556620010069. (In Russ)
4. Diffuse pollution of water bodies: Problems and solutions. Collective monograph under the supervision of V.I. Danilov-Danilyan. Moscow. RAS 2020. 512 p. (In Russ)
5. Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N. Distribution of Iron and Its Minerals in River Sediments of the Eastern Donbass. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 85–98. (In Russ)

6. Komarov R.S., Reshetnyak O.S. Spatio-temporal variability of ionic runoff in the Kuban River basin. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 3. pp. 191–203. DOI: 10.46698/q4491-7472-5566-w. (In Russ)
7. Makarov V.N. Formation of technogenic hydrochemical flows during the development of tin deposits in the Arctic regions of Yakutia. *Arctic: Ecology and Economics*. 2024. -ol. 14. No. 4. pp. 549–561. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-549-561. (In Russ)
8. Mukasheva A.S., Lopareva T.Ya. Genetic homogeneity of ion-salt composition of water in the Balkhash-Ilei and Aral-Syrdarya basins. *Bulletin of ASTU. Series: Fisheries*. 2013. No. 2. pp. 111–115. (In Russ)
9. Nikanorov A. M. *Hydrochemistry: textbook*. 3rd ed., supplemented. Rostov-on-Don. NOK. 2008. 461 p. (In Russ)
10. Nikanorov A. M., Bryzgalo V. A. *Freshwater ecosystems in impact regions of Russia*. Rostov-on-Don. NOK. 2006. 275 p. (In Russ)
11. Reshetnyak O.S. Analysis of the probability of metamorphism of the ionic composition of ultra-fresh waters of Russian Arctic Rivers. *Arctic: Ecology and Economics*. 2023. Vol. 14. No. 3. pp. 437–448. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-3-437-448. (In Russ)
12. Yanin E.P. Changes in the chemical composition and technogenic metamorphosis of river waters in industrial and urbanized areas. *Scientific and Technical Aspects of Environmental Protection*. 2006. No. 3. pp. 2–27. (In Russ)
13. Yanin E.P. Main trends in changes in the geochemical features of watercourses and reservoirs in anthropogenic landscapes. *Dynamics of Geographical Systems*. Moscow. MSU. 1983. pp. 13–14. (In Russ)
14. Ekka A., Pande S., Jiang Y., Zaag P. Anthropogenic modifications and river ecosystem services: A landscape perspective. *Water*. 2020. Vol. 12. Art. No. 2706. DOI: 10.3390/w12102706.
15. Gong S., Bai X., Luo G., Li C., Wu L., Chen F., Ran C, Xi H., Zhang S. Climate change has enhanced the positive contribution of rock weathering to the major ions in riverine transport. *Global and Planetary Change*. 2023. Vol. 228. Art. No. 104203. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2023.104203.
16. Kaushal S.S., Likens G.E., Mayer P.M., Shatkay R.R., Shelton S.A., Grant S.B. et al. The anthropogenic salt cycle. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2023. Vol. 4. pp. 770–784. DOI: 10.1038/s43017-023-00485-y.
17. Lechuga-Crespo J.L., Sanchez-Perez J.M., Sauvage S., Hartmann J., Amiotte Suchet P., Probst J. L., Ruiz-Romera E. A model for evaluating continental chemical weathering from riverine transports of dissolved major elements at a global scale. *Global and Planetary Change*. 2020. Vol. 192. Art. No. 103226. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2020.103226.
18. Liu J., Han G. Major ions and $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ in Jiulongjiang River water: Investigating the relationships between natural chemical weathering and human perturbations. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 724. Art. No. 138208. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138208.
19. Tepanosyan G., Poghosyan Z., Sahakyan L. Geochemical characterization of changes in the chemical composition of river sediments under the continuous anthropogenic influence of Yerevan, Armenia. *Environmental Pollution*. 2024. Vol. 359. Art. No. 124553.
20. Wang H., Wu S., Xu J., Zhang L., Li K., Li J., Shu H. and Chu J. Study on the surface water chemical composition and water quality pollution characteristics of the Shiyang River Basin, China. *Hydrology*. 2025. Vol. 12. Issue 6. Art. No. 132. DOI: 10.3390/hydrology12060132.
21. Wu J., Xu N., Wang, Y., Zhang W., Borthwick Alistair G.L., Ni J. Global syndromes induced by changes in solutes of the world's large rivers. *Nature Communications*. 2021. Vol. 12. Art. No. 5940. DOI: 10.1038/s41467-021-26231-w.