

УДК 504.453+504.4.054

DOI: 10.46698/q4491-7472-5566-w

Оригинальная статья

Пространственно-временная изменчивость ионного стока в бассейне р. Кубани

Р.С. Комаров^{1,2}, О.С. Решетняк¹

¹ Южный федеральный университет,
Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40;

² Гидрохимический институт, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону,
пр. Стачки, 198, e-mail: olgare1@mail.ru

Статья поступила: 12.05.2024, доработана: 16.07.2024, принята к публикации: 17.07.2024

Резюме: Актуальность работы. Исследование стока растворенных веществ (в том числе ионного стока рек) имеет важное значение в глобальном масштабе. Происходящие изменения в окружающей среде оказывают влияние на процессы формирования химического состава и качества речных вод в бассейне Кубани. **Цель работы.** Проанализировать пространственно-временную изменчивость ионного стока в пределах бассейна р. Кубани. **Методы исследования.** Исследование проведено на основе многолетних гидрологических и гидрохимических данных государственной наблюдательной сети Росгидромета за период с 1990 по 2020 гг. Статистически значимые тенденции ионного стока определялись с помощью коэффициента ранговой корреляции Кендалла. Теснота связи между водным и ионным стоком находилась с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена. Для выделения характерных периодов ионного стока использовался графоаналитический метод нормализованных разностно-интегральных кривых. Существенность различий выделенных временных интервалов проверялась с помощью непараметрического *U*-критерия Манна-Уитни. **Результаты работы.** По длине реки Кубани величина ионного стока последовательно возрастала и достигала максимальных значений в нижнем течении. Среди притоков наибольшие величины абсолютных значений ионного стока характерны для рр. Лабы и Белой. При рассмотрении пространственного распределения модулей стока была обнаружена неоднородность интенсивности выноса ионов в пределах водосбора р. Кубани, обусловленная совокупным влиянием природных и техногенных факторов. Анализ многолетних колебаний ионного стока показал, что чаще всего определяющим фактором в его динамике был водный сток. Наблюдались статистически достоверные тенденции изменчивости ионного стока в нижнем течении р. Кубани, ее дельте и рр. Пшиш и Псекупс. Существенные изменения в выносе ионов через рук. Протока связаны с сокращением водного стока на фоне продолжающегося уменьшения минерализации воды.

Ключевые слова: бассейн р. Кубани, ионный сток, макрокомпоненты, модули ионного стока, коэффициент корреляции, тенденции.

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

Для цитирования: Комаров Р.С., Решетняк О.С. Пространственно-временная изменчивость ионного стока в бассейне р. Кубани. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 191-203. DOI: 10.46698/q4491-7472-5566-w

DOI: 10.46698/q4491-7472-5566-w

Original paper

Spatiotemporal variability of ion flux in the Kuban River basin

R.S. Komarov^{ID}1,2, O.S. Reshetnyak^{ID}1¹ Southern Federal University, 40 R. Zorge Str., Rostov-on-Don 344090, Russian Federation;² Federal State Budgetary Institution, Hydrochemical Institute, 198 Stachki Ave.,
Rostov-on-Don 344090, Russian Federation,
e-mail: olgare1@mail.ru*Received: 12.05.2024, revised: 16.07.2024, accepted: 17.07.2024*

Abstract: Relevance. The study of dissolved substances flow (including ion flux of rivers) is important on a global scale. The ongoing environmental changes have an impact on the processes of formation of the chemical composition and water quality in the Kuban basin. **Aim.** To analyze the spatiotemporal variability of ion flux within the Kuban River basin. **Research methods.** The study was based on long-term hydrological and hydrochemical data from the Roshydromet State Observation Network for the period from 1990 to 2020. Statistically significant trends in ion flux were determined using the Kendall rank correlation coefficient. The strength of the relationship between water and ion flux was found using the Spearman rank correlation coefficient. The graphical-analytical method of normalized difference-integral curves was used to identify characteristic periods of ion flux. The significance of the differences between the identified time intervals was tested using the nonparametric Mann-Whitney *U*-test. **Results.** Along the length of the Kuban River, the ion flux value consistently increased and reached its maximum values in the lower reaches. Among the tributaries, the highest absolute values of ion flux are characteristic of the Laba and Belaya rivers. The spatial distribution of ion flux modules revealed a heterogeneity of ion discharge intensity within the Kuban River basin, which is caused by the combined influence of natural and anthropogenic factors. The analysis of long-term fluctuations of ion flux showed that the most frequent determining factor in its dynamics was water runoff. Statistically significant trends in the variability of ion flux were observed in the lower reaches of the Kuban River, its delta, and the Pshish and Psekups rivers. A decreasing linear trend is characteristic of the majority of the identified trends. Significant changes in ion flux through the Protoka branch are associated with a decrease in water runoff against the background of a continuing decrease in water mineralization.

Keywords: Kuban river basin, ion flux, macrocomponents, ion flux modules, correlation coefficient, trends.

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: Komarov R.S., Reshetnyak O.S. Spatiotemporal variability of ion flux in the Kuban River basin. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 191-203. DOI: 10.46698/q4491-7472-5566-w

Введение

Изучение стока растворенных веществ (в том числе ионного стока рек) имеет важное значение в глобальном масштабе, поскольку антропогенная деятельность может приводить к нарушению естественных «солевых циклов» и засолению пресных вод [Kaushal et al., 2023; Wu et al., 2021], а климатические изменения – к на-

рушению естественных процессов выветривания горных пород (в основном карбонатных, силикатных и сульфатных минералов) [Lechuga-Crespo et al., 2020; Liu et al., 2020; Zhong et al., 2020]. Так по данным работы [Gong et al., 2023] изменение климата усилило положительный вклад процессов выветривания горных пород в возрастание стока основных ионов в речном переносе.

Исследование ионного стока (ИС) рек бассейна Кубани имеет значение в связи с прямым и косвенным воздействием на поверхностные водные объекты. Происходящие изменения окружающей среды оказывают влияние на процессы формирования химического состава и качества воды и в дальнейшем могут повлиять на прибрежные акватории Азовского моря.

Проведенные ранее исследования свидетельствуют о значительной пространственно-временной изменчивости качества поверхностных вод в пределах бассейна р. Кубани [Клименко и др., 2007; Михайлов и др., 2010; Никаноров и др., 2013; Решетняк, Комаров, 2023; Комаров, Решетняк, 2023]. ИС преимущественно изучен в нижнем течении и дельтовых рукавах Кубани. Качественная характеристика речных вод не в полной мере отражает степень техногенной преобразованности отдельных компонентов гидрохимического состава поверхностных вод и ионного стока. Изучение пространственной и временной динамики составляющих химического стока (стока главных ионов, органических веществ, биогенных элементов и т. д.) позволяет более детально оценить степень техногенного воздействия и выявить антропогенную составляющую стока веществ.

После начала регулярных наблюдений за химическим составом поверхностных вод в начале XX в. стала возможной и оценка ионного стока. Вынос р. Кубанью макрокомпонентов впервые был оценен О.А. Алекиным. Для расчета использовались данные о химическом составе за 1936–1941 гг. в пункте наблюдений х. Тиховский и среднемноголетнее значение годового стока воды [Алекин, 1949]. Позже значения были уточнены В.Я. Еременко и др. Оценка проводилась на основе данных 1940–1950 гг. для пунктов г. Краснодар и х. Тиховский [Еременко и др., 1953]. В работе О.А. Алекина и Л.В. Бражниковой приводятся сведения о суммарном стоке главных ионов в районе Переволоцкого узла. Помимо этого, были рассчитаны значения ионного стока притоков: рр. Малый Зеленчук, Уруп, Лаба, Фарс, Белая, Курджипис, Пшеха, Афипис и Адагум [Алекин, Бражникова, 1964].

Позже внимание обращалось на изменения в стоке растворенных веществ р. Кубани вследствие техногенного воздействия. В конце XX века наблюдалось увеличение антропогенной составляющей стока главных ионов [Бортник, Друмева, 1995] и значительное изменение в структуре ионного стока [Коняев и др., 2002]. С 1981 по 2000 гг. отмечалось последовательное увеличение ионного стока по пятилетним периодам в пункте наблюдений х. Тиховский, динамика антропогенной составляющей не имела выраженной тенденции [Коротова и др., 2002].

Использование метода многомерного кластерного анализа позволило авторам работы [Snezhko et al., 2020] не только сгруппировать реки (притоки в бассейне Кубани), но и выделить отдельные ионы металлов (кадмий, молибден и алюминий) – индикаторы загрязнения речных вод в бассейне.

Стоку растворенных веществ в дельтовых рукавах р. Кубани уделялось внимание в работах [Михайлов и др., 2010; Решетняк, Комаров, 2023]. Хозяйственное освоение бассейна Кубани и зарегулирование стока способствовало изменению минерализации и ионного состава воды в нижнем течении и дельте.

В свою очередь, ионный сток притоков Кубани и его временная динамика изучена в меньшей степени. В литературе можно найти лишь немногочисленные данные по этому вопросу [Алекин, Бражникова, 1964; Ресурсы..., 1973; Кочетов, 1976]. Таким образом, с учетом важности и отсутствием современных данных, актуальным является исследование ионного стока в бассейне Кубани в современных условиях антропогенного воздействия. Это и определило цель настоящего исследования – проанализировать пространственно-временную изменчивость ионного стока в пределах бассейна р. Кубани.

Материалы и методы исследования

Исследование проведено на основе многолетних гидрологических и гидрохимических данных государственной наблюдательной сети Росгидромета. Исходные массивы данных включали информацию о расходах воды и концентрациях главных ионов (макрокомпонентов) в воде – гидрокарбонатов (HCO_3^-), хлоридов (Cl^-), сульфатов (SO_4^{2-}), ионов кальция (Ca^{2+}), ионов магния (Mg^{2+}), суммы ионов натрия и калия ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) – за период с 1990 по 2020 годы. Объектами исследования выступали участки р. Кубани (г. Невинномысск, г. Армавир, ст-ца Ладожская, г. Краснодар и х. Тиховский), дельтовых рукавов (рук. Петрушин, Казачий Ерик и Протока) и основных притоков (рр. Лаба, Белая, Пшеха, Пшиш, Псекупс, Афипис и Адагум).

Для расчета объемов стока химических веществ с водосбора реки Кубани использованы многолетние гидрологические и гидрохимические данные, собранные из архивных фондов Росгидромета и Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (<https://gmvo.skniivh.ru>). При наличии незначительных пробелов в рядах гидрологических данных выполнялось их восстановление. С использованием данных об объемах годового стока воды в одном или нескольких пунктах-аналогах по уравнениям линейной регрессии были восстановлены значения объемов годового стока для некоторых гидрологических постов. Из всего массива восстановлено всего 6 % используемых в работе данных.

На основе сведений о концентрациях веществ и значениях годового стока воды выполнен расчет стока отдельных макрокомпонентов и ионного стока (по сумме главных ионов) рек бассейна Кубани прямым способом.

Модуль ионного стока M (т/км² в год) рассчитан как отношение ионного стока к площади водосбора.

Для статистической обработки многолетних данных использованы MS Excel 2010 и Statistica 13.3. Статистически значимые временные тенденции ионного стока определялись с помощью коэффициента ранговой корреляции Кендалла и уровня доверительной вероятности, при котором эти коэффициенты могут считаться статистически значимыми (при $p < 0,05$).

Как правило, оценку тесноты корреляционной связи проводят по модулю значения коэффициента корреляции (r) по одной из многочисленных шкал: Чеддока, Коэна, Эванса и др. Учитывая неравномерность сроков отбора проб и сильную внутригодовую вариацию концентраций макрокомпонентов, а также используя принцип разбивки диапазона значений r от 0 до 1,0 на равные отрезки, трактовка тесноты связи по линейному коэффициенту корреляции осуществлялась по следующим критериям: $0,10 \leq r < 0,25$ – связь слабая; $0,25 \leq r < 0,50$ – связь средняя (умеренная); $0,50 \leq r < 0,75$ – связь сильная (тесная); $0,75 \leq r < 1,00$ – очень сильная связь. Принято, что при $r < 0,10$ статистическая связь отсутствует.

Для определения взаимосвязи между водным и ионным стоком рассчитаны значения коэффициента ранговой корреляции Спирмена, который является непараметрическим аналогом коэффициента корреляции Пирсона. В отличие от последнего для коэффициента корреляции Спирмена проверка на нормальность распределения не требуется. Связь считалась статистически значимой при $p < 0,05$.

Для выделения характерных периодов ИС (фаз повышенного или пониженного ИС относительно среднесуточных значений) использовался графоаналитический метод нормализованных разностно-интегральных кривых. Для подтверждения правильности выделения этих характерных периодов проводилась оценка статистически значимых отличий значений ИС с помощью непараметрического U -критерия Манна-Уитни. Различия считались значимыми при $p < 0,05$.

Результаты работы и их обсуждение

Временная изменчивость ионного стока рек бассейна Кубани

На основе данных о концентрациях веществ и объемах водного стока были рассчитаны значения ИС за период 1990–2020 гг. для 17 пунктов наблюдений: по длине р. Кубани, в дельтовых рукавах и на основных притоках. Статистические характеристики полученных значений ИС представлены в таблице 1.

Как в пределах всего бассейна р. Кубани, так и в отдельных пунктах наблюдений абсолютные значения ИС изменялись в широких пределах. Значения коэффициентов вариации (C_v) варьировались от 23 % (достаточно однородные данные) в районе г. Темрюка до 50 % (неоднородные данные) в районе г. Крымска.

Таблица 1 / Table 1

Статистические характеристики ионного стока в пределах бассейна р. Кубани (1990–2020 гг.) / Statistical characteristics of ion flux within the Kuban River basin (1990–2020)

№	Водный объект, пункт наблюдений / Water body, observation point	Значения ионного стока мин–макс среднее (тыс. т) / Ion flux values min–max mean (thousand tons)	Коэффициент вариации (C_v , %) / Coefficient of variation (C_v , %)	Коэффициент корреляции Кендалла / Kendall correlation coefficient
По длине р. Кубани / Along the length of the Kuban River				
1	р. Кубань, г. Невинномысск / Kuban River, Nevinnomyssk	$\frac{-*}{612}$	–	–
2	р. Кубань, г. Армавир / Kuban River, Armavir	$\frac{522-3016}{1766}$	33	-0,12
3	р. Кубань, ст-ца Ладожская / Kuban River, Ladozhskaya	$\frac{818-4489}{2558}$	34	-0,20
4	р. Кубань, г. Краснодар / Kuban River, Krasnodar	$\frac{1975-6116}{3864}$	24	-0,28**
5	р. Кубань, х. Тиховский / Kuban River, Tikhovsky	$\frac{3132-7805}{4673}$	24	-0,05

Дельтовые рукава р. Кубани / Delta branches of the Kuban River				
6	рук. Петрушин, г. Темрюк / Petrushin branch, Temryuk	$\frac{1207-3299}{2114}$	23	-0,23
7	рук. Казачий Ерик, х. Дубовый Рынок / Kazachy Erik branch, Dubovy Rynok	$\frac{11-215}{91}$	48	-0,06
8	рук. Протока, г. Славянск- на-Кубани / Protoka branch, Slavyansk-on-Kuban	$\frac{818-3836}{2191}$	28	-0,25
9	рук. Протока, х. Слободка / Protoka branch, Slobodka	$\frac{1459-4679}{2592}$	29	-0,50
Притоки р. Кубани / Tributaries of the Kuban River				
10	р. Лаба, х. Догужиев / Laba River, Doguzhiyev	$\frac{474-1926}{1215}$	27	-0,13
11	р. Белая, п. Гузерипль / Belaya River, Guzeripl	$\frac{48-176}{86}$	29	0,21
12	р. Белая, г. Майкоп / Belaya River, Maikop	$\frac{132-445}{283}$	30	0,13
13	р. Пшеха, г. Апшеронск / Pshekha River, Apsheronsk	$\frac{66-274}{170}$	38	–
14	р. Пшиш, г. Хадыженск / Pshish River, Khadyzhensk	$\frac{20-87}{44}$	37	-0,29
15	р. Псекупс, г. Горячий Ключ / Psekups River, Goryachy Klyuch	$\frac{42-220}{117}$	40	-0,30
16	р. Афипис, ст-ца Смоленская / Afips River, Smolenskaya	$\frac{36-90}{60}$	31	–
17	р. Адагум, г. Крымск / Adagum River, Krymsk	$\frac{2-99}{46}$	50	-0,14

Примечание: *недостаточно данных; **полу жирным курсивом отмечены статистически значимые ($p < 0,05$) значения коэффициента корреляции Кендалла. Положительные значения – возрастающая тенденция, отрицательные значения – убывающая тенденция. / *Note:* *insufficient data; **statistically significant ($p < 0.05$) values of the Kendall correlation coefficient are marked in bold italics. Positive values are an increasing trend, negative values are a decreasing trend.

По длине р. Кубани величина ИС последовательно возрастала. Наибольших средних значений ИС достигал в нижнем течении реки в районе х. Тиховского (4673 тыс. т). Ниже река делится на два основных дельтовых рукава – Кубань и Протоку. Главным рукавом является Кубань. В 16 км от устья он разделяется на рук. Петрушин, рук. Казачий Ерик и протоку Переволока [Лурье и др., 2005]. Речной сток в нижнем течении р. Кубани примерно поровну делится по основным дельтовым рукавам и поступает в Азовское море. Суммарный среднегодовой ИС через рук. Петрушин и рук. Протока в Азовское море за период 1990–2020 гг. составлял 4706 тыс. т. При этом в среднем через рук. Протока в Азовское море выносилось на 23 % больше ионов, чем через рук. Петрушин.

Среди изученных притоков р. Кубани наибольшие величины ИС характерны для рр. Лабы и Белой. Стоки суммы главных ионов для этих рек оценены на ос-

нове данных, полученных на пунктах наблюдений, которые располагаются на разном расстоянии от устьев. Ионный сток с водосбора Лабы в среднем составляет 1215 тыс. т., а для р. Белой аналогичное значение можно получить с использованием принципа экстраполяции величин ИС одного изучаемого бассейна реки на соседний речной бассейн [Алекин, Бражникова, 1964]. Таким образом, нами получены ориентировочные значения ИС в бассейне р. Белой – примерно 600 тыс. т (за период 1990–2020 гг.). Такой расчет очень условен, однако дает основания полагать, что ИС р. Белой может быть в два раза меньше ИС р. Лабы.

Среднегодовые абсолютные величины ИС остальных рек в среднем изменялись от 44 до 170 тыс. т. Такие сравнительно небольшие значения обусловлены низкой водностью рассматриваемых рек.

Для количественной оценки тенденций временной изменчивости значений ИС в бассейне р. Кубани рассчитан ранговый коэффициент корреляции Кендалла, характеризующий меру линейной связи между годом и ионным стоком. Для большинства исследуемых участков рек формируется убывающий тренд. Статистически значимыми тенденциями являются изменения ИС только на пяти участках: р. Кубань (г. Краснодар), рук. Протока (г. Славянск-на-Кубани), рук. Протока (х. Слободка), р. Пишиш (г. Хадыженск) и р. Псекупс (г. Горячий Ключ). В основном обнаруженная корреляционная связь характеризуется как умеренная (умеренной силы), кроме участка рук. Протока у х. Слободка, где выявлена сильная статистически значимая взаимосвязь.

Применение корреляционного анализа обоснованно тем, что это хороший оценочный метод для предварительной оценки направленности временных тенденций ионного стока рек. В силу значительной вариабельности гидрологических и гидрохимических данных, влияния на ионный состав речных вод множества факторов и процессов, ожидать высокую линейную зависимость нельзя. Поэтому линейные тренды даже умеренной силы являются статистически значимыми для природных вод.

Пространственная изменчивость модуля ионного стока рек бассейна Кубани

Для анализа пространственной изменчивости ИС рек с различными водностью и площадями водосборов рассчитали среднемноголетние годовые модули (показатели) ионного стока. Путем вычитания значений на расчетном и вышележащем пункте наблюдений получали показатели ИС частных водосборов [Джамалов и др., 2020]. Для картографирования (визуального представления изменчивости модулей ИС) выполнено разделение общего диапазона значений на пять интервалов. Полученные результаты представлены на рисунке 1.

В бассейне р. Кубани для водосборной площади 45000 км² среднее значение модуля ионного стока составляет 86 т/км² в год. При детальном рассмотрении пространственного распределения показателей ИС прослеживается неоднородность интенсивности выноса ионов в пределах водосбора. На условной линии Крымск – Смоленская – Горячий Ключ – Апшеронск – Хадыженск – Майкоп расположены пункты наблюдений, относящиеся к «закубанским» рекам и притокам среднего течения р. Кубани. Для этих водотоков значения модулей стока изменяются в широких пределах (62–200 т/км² в год).

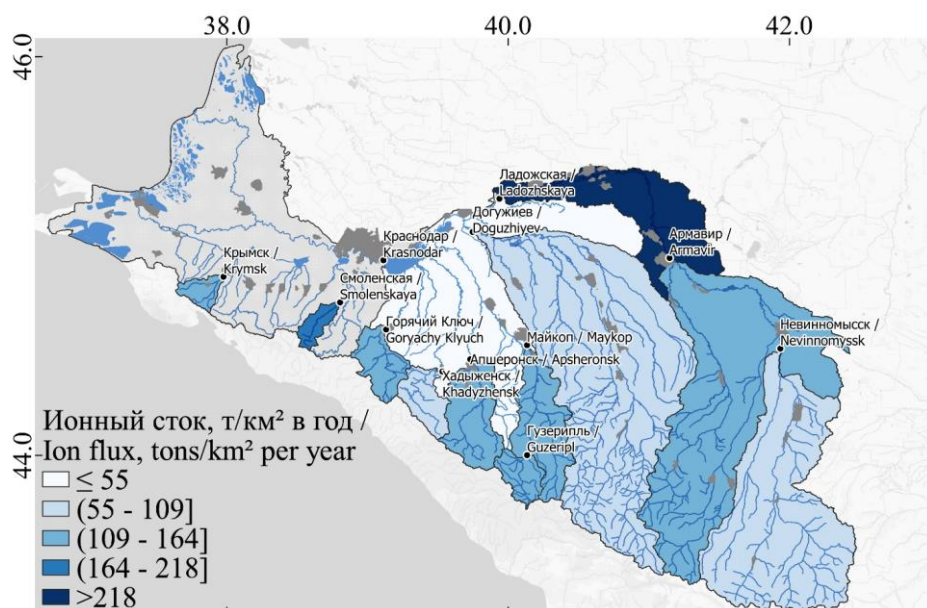


Рис. 1. Пространственная изменчивость модуля ионного стока в пределах бассейна р. Кубани /
Fig. 1. Spatial variability of the ion flux modulus within the Kuban River basin

Повышенные значения показателя ИС характерны для участка р. Кубани от г. Невинномысска до г. Армавира (121 т/км^2 в год). Вероятно, это связано с интенсивным выносом ионов двумя крупными левобережными притоками – рр. Большой Зеленчук и Уруп. Данные притоки имеют относительно высокую водность. При этом минерализация воды р. Уруп в межень достигает значений 1 г/дм^3 и выше [Никаноров и др., 2013].

Максимальные значения модуля ИС наблюдаются в среднем течении р. Кубани. На участке от г. Армавира до ст-цы Лadoжской с территории площадью $\sim 2900 \text{ км}^2$ поступает около 273 т/км^2 в год главных ионов. По всей видимости, высокое значение показателя ионного стока обусловлено как совокупностью природных условий, так и техногенным влиянием. Река Кубань на данном участке протекает преимущественно в равнинной зоне. Течение становится более спокойным, возрастает температура воды. В районе ст-цы Темижбекской р. Кубань поворачивает на юго-запад и становится более извилистой [Лурье и др., 2005]. Увеличивается вклад подземной составляющей в водный сток, почвогрунты существенно засолены [Михайлов и др., 2010]. Немногочисленные водотоки, протекающие в аналогичных природных условиях и впадающие в р. Кубань между г. Усть-Лабинском и ст-цей Лadoжской имели минерализацию от $1,0 \text{ г/дм}^3$ (период половодья) до $2\text{--}4 \text{ г/дм}^3$ и более (период межени) [Ресурсы ..., 1973].

За период 1990–2020 гг. среднегодовое значение минерализации воды на рассматриваемом участке последовательно увеличивалось и составляло 459 мг/дм^3 в пункте наблюдений г. Армавир, 561 мг/дм^3 – г. Кропоткин, 609 мг/дм^3 – ст-ца Лadoжская. Объемы водного стока (W) на гидропостах в районе г. Армавир и у ст-цы Лadoжская в целом были близки по среднегодовым значениям ($\sim 4,2 \text{ км}^3$ за период 1990–2020 гг.). Техногенное загрязнение поверхностных вод здесь происходило за счет сброса недостаточно очищенных сточных вод, а основная доля забора воды приходилась на сельское хозяйство (96,5 %) (<https://kbvu-fgu.ru/docs7>).

Характерные фазы (периоды) изменчивости ионного стока

Динамика ионного стока определяется водностью реки и содержанием в природных водах макрокомпонентов. Поэтому нарушение зависимости между W и ИС может указывать на значительное техногенное воздействие, проявляющееся в виде загрязнения водных объектов. В таком случае будет происходить ослабевание корреляционной связи между объемами стока воды и стоком ионов.

Как показано выше, для большинства исследуемых участков рек в бассейне Кубани формируется убывающий тренд для ионного стока, но статистически значимыми являются изменения только на пяти участках – р. Кубань (г. Краснодар), рук. Протока (г. Славянск-на-Кубани), рук. Протока (х. Слободка), р. Пшиш (г. Хадзыженск) и р. Псекупс (г. Горячий Ключ) (табл. 1), для которых далее более детально рассмотрим изменчивость ИС и его компонентов.

Для данных речных участков на основе графоаналитического метода разностно-интегральных кривых выделены характерные периоды изменений величин ионного стока (табл. 2). Для всех пяти участков общий период разделился на два характерных периода повышенных или пониженных значений ИС относительно средне-многолетних значений. При проверке гипотезы о принадлежности двух сравниваемых выборок значений ИС к одной и той же генеральной совокупности с помощью U -критерия Манна-Уитни установлены существенные статистически значимые отличия сравниваемых периодов ($p < 0,05$).

Таблица 2 / Table 2

Ионный сток и его изменчивость в характерные периоды для отдельных участков рек (со значимым убывающим трендом) в бассейне р. Кубани / Ion flux and its variability during characteristic periods for certain river sections (with a significant decreasing trend) in the Kuban River basin

№	Водный объект, пункт наблюдений / Water body, observation point	Выделенный период / Selected period	Ионный сток, тыс. т / Ion flux, thousand tons	Относительные изменения средних значений, % / Relative changes in mean values, %	
				Ионный сток / Ion flux	W
1	р. Кубань, г. Краснодар / Kuban River, Krasnodar	1990–2006 2007–2020	4307 3327	-23	-14
2	рук. Протока, г. Славянск-на-Кубани / Protoka branch, Slavyansk-on-Kuban	1990–2006 2007–2020	2483 1836	-26	-24
3	рук. Протока, х. Слободка / Protoka branch, Slobodka	1990–2006 2007–2020	3036 2053	-32	-20
4	р. Пшиш, г. Хадзыженск / Pshish River, Khadyzhensk	1994–2005 2006–2018	58 35	-40	-45
5	р. Псекупс, г. Горячий Ключ / Psekups River, Goryachy Klyuch	1990–1999 2000–2016	153 88	-42	-47

Одинаковые временные периоды получены для нижнего течения р. Кубани (г. Краснодар) и для дельтового рукава Протока (г. Славянск-на-Кубани, х. Слобод-

ка). На этих участках произошло синхронное снижение ИС на 23–32 % на фоне снижения водного стока в относительно меньших изменениях (на 14–24 %) (табл. 2). Здесь помимо общих тенденций и характерных периодов отмечается также высокая синхронность изменчивости ИС. Форма нормализованных разностно-интегральных кривых свидетельствует о подобии многолетних колебаний на разных участках (рис. 2). Это же подтверждается статистически значимыми величинами ($p < 0,05$) коэффициента корреляции Спирмена между ИС в сравниваемых пунктах ($r = 0,76–0,84$).

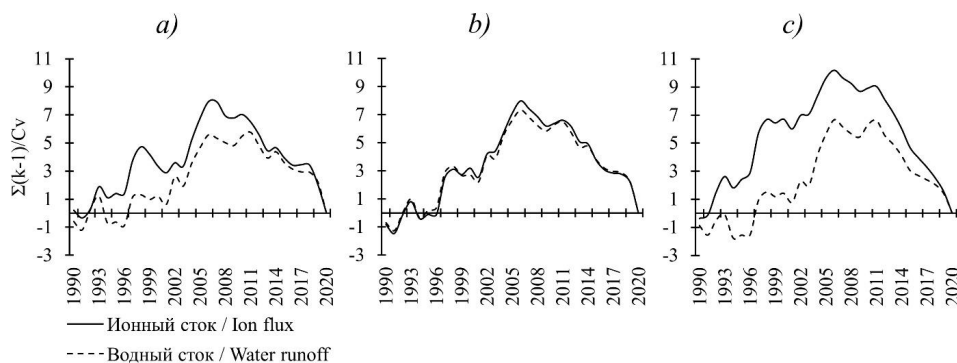


Рис. 2. Нормализованные разностно-интегральные кривые водного и ионного стока в нижнем течении Кубани: (а) – р. Кубань, г. Краснодар, (б) – рук. Протока, г. Славянск-на-Кубани, (с) – рук. Протока, х. Слободка /

Fig. 2. Normalized difference-integral curves of water runoff and ion flux in the lower reaches of the Kuban: (a) – Kuban River, Krasnodar, (b) – Protoka branch, Slavyansk-on-Kuban, (c) – Protoka branch, Slobodka

В целом выявленные особенности многолетних колебаний водного и ионного стока указывают на наличие общих причин происходящих изменений.

Выводы

Результаты проведенных исследований позволили оценить пространственно-временную изменчивость ионного стока в бассейне р. Кубани за многолетний период.

В пределах речного бассейна абсолютные значения ИС изменялись в широких пределах. По длине реки величина ИС последовательно возрастала и достигала 4673 тыс. т/год в нижнем течении. Среди притоков наибольшие величины абсолютных значений ИС характерны для рр. Лабы и Белой. Среднегодовые значения ИС остальных водотоков были сравнительно небольшими, что обусловлено их водоносностью.

При рассмотрении пространственного распределения модулей ионного стока была обнаружена неоднородность интенсивности выноса ионов в пределах водосбора р. Кубани, обусловленная совокупным влиянием природных и техногенных факторов. Повышенные значения показателя ИС характерны для участка от г. Невинномысска до г. Армавира, а также для отдельных притоков. Максимальный модуль ИС наблюдался в среднем течении р. Кубани на участке от г. Армавира до ст-цы Ладожской. Чаще всего определяющим фактором в динамике ИС являлся водный сток.

Наблюдались статистически достоверные тенденции изменчивости ионного стока в нижнем течении р. Кубани, ее дельте и рр. Пшиш и Псекупс.

В 2007–2020 гг. в нижнем течении р. Кубани и рук. Протока ионный сток снизился в 1,3–1,5 раза по сравнению с предшествующим периодом (1990–2006 гг.). Выявленные особенности многолетних колебаний указывают на наличие общих причин происходящих изменений в нижнем течении р. Кубани и в рук. Протока.

Литература

1. Алекин О.А. Гидрохимия рек СССР. Реки Кавказа и Азиатской территории СССР. // Труды ГГИ. – 1949. – Вып. 15(69). – 144 с.
2. Алекин О.А., Бражникова Л.В. Сток растворенных веществ с территории СССР. М: Наука, 1964. – 144 с.
3. Бортник В.Н., Друмева М.А. Оценка антропогенной составляющей солевого стока Дона и Кубани. // Водные ресурсы. – 1995. – Т. 22. № 2. – С. 155–158.
4. Джамалов Р.Г., Решетняк О.С., Сафронова Т.И., Власов К.Г., Галагур К.Г., Григорьев В.Ю., Оботуров А.С. Гидрохимический сток рек Европейской части России. Атлас. М: Ролик, 2020. – 155 с.
5. Еременко В.Я., Зенин А.А., Коновалов Г.С. Сток растворенных веществ р. Кубани и ее гидрохимический режим. // Гидрохимические материалы. – 1953. – Т. 21. – С. 30–53.
6. Клименко О.А., Косолапов А.Е., Радько Г.И. Оценка пространственно-временных изменений качества воды в бассейне р. Кубань. // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2007. – № 4. – С. 38–54.
7. Комаров Р.С., Решетняк О.С. Комплексная оценка качества воды притоков реки Кубани. // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2023. – Т. 8. № 2(32). – С. 24–30. DOI: 10.25744/genb.2023.32.57.004.
8. Коняев С.В., Белоногов В.А., Торсуев Н.П. Колебания ионного стока р. Кубань вследствие антропогенного воздействия. // Известия Русского географического общества. – 2002. – Т. 134. Вып. 5. – С. 48–53.
9. Коротова Л.Г., Смирнов М.П., Клименко О.А., Жемчужнова Н.В., Дубовикова Г.Ф. Вынос реками минеральных, биогенных и загрязняющих веществ в Азовский бассейн. // Экосистемные исследования Азовского моря и побережья. Т. IV. / Отв. ред. Г.Г. Матишов. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2002. – С. 29–38.
10. Кочетов Н.И. Количественная оценка химической денудации на Западном Кавказе по гидрохимическим данным. // Геоморфология. – 1976. – № 3. – С. 61–66.
11. Лурье П.М., Панов В.Д., Ткаченко Ю.Ю. Река Кубань: гидрография и режим стока. С.-П.: Гидрометеиздат, – 2005. 498 с.
12. Михайлов В.Н., Магрицкий Д.В., Иванов А.А. Гидрология дельты и устьевого взморья Кубани. М: ГЕОС, – 2010. 728 с.
13. Никаноров А.М., Минина Л.И., Лобченко Е.Е., Ничипорова И.П. Динамика качества поверхностных вод юга России. // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2013. – № 6. – С. 57–72.
14. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 8. Северный Кавказ. Л.: Гидрометеиздат, – 1973. 447 с.
15. Решетняк О.С., Комаров Р.С. Межгодовая и сезонная изменчивость стока растворенных веществ в дельтовых рукавах реки Кубани. // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2023. – № 1. – С. 95–105. DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2023-1-95-105.
16. Gong S., Bai X., Luo G., Li C., Wu L., Chen F., Ran Cэ, 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. 104203. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2023.104203.

17. Kaushal S.S., Likens G.E., Mayer P.M., Shatkay R.R., Shelton S.A., Grant S.B., Utz R.M., Yaculak A.M., Maas C.M., Reimer J.E., Bhide S.V., Malin J.T., Rippey M.A. The anthropogenic salt cycle. // *Nature Reviews Earth & Environment*. – 2023. – Vol. 4. – pp. 770–784. DOI: 10.1038/s43017-023-00485-y.
18. Lechuga-Crespo J.L., Sánchez-Pérez 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. 103226. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2020.103226.
19. 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. 138208. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138208.
20. Snezhko V., Benin D., Lukyanets A., Kondratenko L. Assessing the Pollution Level in the Kuban River Basin by Multivariate Cluster Analysis. // *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. – 2020. – Vol. 17. No. 4. – pp. 73–80. DOI: 10.3233/AJW200053.
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. 5940. DOI: 10.1038/s41467-021-26231-w.
22. Zhong J., Li S.L., Ibarra D.E., Ding H., Liu C.Q. Solute production and transport processes in Chinese monsoonal rivers: Implications for global climate change. // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2020. – Vol. 34. DOI: 10.1029/2020GB006541.

References

1. Alekin O.A. Hydrochemistry of rivers of the USSR. Rivers of the Caucasus and the Asian territory of the USSR. Trudy GGI. 1949. Issue 15(69). 144 p. (In Russ.)
2. Alekin O.A., Brazhnikova L.V. Flux of dissolved substances from the territory of the USSR. Moscow. Nauka. 1964. 144 p. (In Russ.)
3. Bortnik V.N., Drumeva M.A. Assessment of the anthropogenic component of the salt flux of the Don and Kuban. *Water Resources*. 1995. Vol. 22. No. 2. pp. 155–158. (In Russ.)
4. Jamalov R.G., Reshetnyak O.S., Safronova T.I., Vlasov K.G., Galagur K.G., Grigoriev V.Yu., Oboturov A.S. Hydrochemical flux of rivers of the European part of Russia. Atlas. Moscow. Rolike. 2020. 155 p. (In Russ.)
5. Eremenko V.Ya., Zenin A.A., Konovalov G.S. Flux of dissolved substances of the Kuban River and its hydrochemical regime. *Hydrochemical Materials*. 1953. Vol. 21. pp. 30–53. (In Russ.)
6. Klimenko O.A., Kosolapov A.E., Radko G.I. Assessment of spatio-temporal changes in water quality in the Kuban River basin. *Water management of Russia: problems, technologies, management*. 2007. No. 4. pp. 38–54. (In Russ.)
7. Komarov R.S., Reshetnyak O.S. Integrated water quality assessment of the tributaries of the Kuban River. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2023. Vol. 8. No. 2(32). pp. 24–30. DOI: 10.25744/genb.2023.32.57.004 (In Russ.)
8. Konyaev S.V., Belonogov V.A., Torsuev N.P. Fluctuations in the ion flux of the Kuban River due to anthropogenic impact. In: *Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2002. Vol. 134. Issue 5. pp. 48–53. (In Russ.)
9. Korotova L.G., Smirnov M.P., Klimenko O.A., Zhemchuzhnova N.V., Dubovikova G.F. The flow of the mineral, biogenic and polluting substances into the Azov basin by rivers. *Ecosystem studies of the Azov Sea and coast*. Vol. IV. Edit. G.G. Matishov. Apatity. Kola Scientific Center RAS. 2002. pp. 29–38. (In Russ.)
10. Kochetov N.I. Quantitative evaluation of the chemical denudation at the Western Caucasus based on hydrochemical data. *Geomorphology*. 1976. No. 3. pp. 61–66. (In Russ.)
11. Lurie P.M., Panov V.D., Tkachenko Yu.Yu. The Kuban River: hydrography and flow regime. Saint Petersburg. Gidrometeoizdat. 2005. 498 p. (In Russ.)

12. Mikhailov V.N., Magritskiy D.V., Ivanov A.A. Hydrology of the delta and estuarine coast of the Kuban River. Moscow. GEOS. 2010. 728 p. (In Russ.)
13. Nikanorov A.M., Minina L.I., Lobchenko E.E., Nichiporova I.P. Dynamics of surface water quality in the South of Russia. Water management of Russia: problems, technologies, management. 2013. No. 6. pp. 57–72. (In Russ.)
14. Surface water resources of the USSR. Vol. 8. North Caucasus. Leningrad. Gidrometeoizdat. 1973. 447 p. (In Russ.)
15. Reshetnyak O.S., Komarov R.S. Interannual and seasonal variability of chemical runoff along the main delta branches of the Kuban River. Lomonosov Geography Journal. 2023. No. 1. pp. 95–105. DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2023-1-95-105 (In Russ.).
16. 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. 104203. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2023.104203.
17. Kaushal S.S., Likens G.E., Mayer P.M., Shatkay R.R., Shelton S.A., Grant S.B., Utz R.M., Yaculak A.M., Maas C.M., Reimer J.E., Bhide S.V., Malin J.T., Rippey M.A. The anthropogenic salt cycle. Nature Reviews Earth & Environment. 2023. Vol. 4. pp. 770–784. DOI: 10.1038/s43017-023-00485-y.
18. Lechuga-Crespo J.L., Sánchez-Pérez 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. 103226. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2020.103226.
19. 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. 138208. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138208.
20. Snezhko V., Benin D., Lukyanets A., Kondratenko L. Assessing the Pollution Level in the Kuban River Basin by Multivariate Cluster Analysis. Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2020. Vol. 17. No. 4. pp. 73–80. DOI: 10.3233/AJW200053.
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. 5940. DOI: 10.1038/s41467-021-26231-w.
22. Zhong J., Li S.L., Ibarra D.E., Ding H., Liu C.Q. Solute production and transport processes in Chinese monsoonal rivers: Implications for global climate change. Global Biogeochemical Cycles. 2020. Vol. 34. DOI: 10.1029/2020GB006541.