
**ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ
ЛАНДШАФТОВ/PHYSICAL GEOGRAPHY AND BIOGEOGRAPHY, SOIL GEOGRAPHY AND LANDSCAPE
GEOCHEMISTRY**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.17> EDN: HJFWYN**ВЛИЯНИЕ ЛАНДШАФТНО-ГЕНЕТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ
ВЫСОКОГОРНЫХ ПРИТОКОВ РЕК ЧЕГЕМ И ЧЕРЕК**

Научная статья

Кучменова И.И.^{1,*}, Кондратьева Н.В.², Разумов В.В.³²ORCID : 0000-0001-7313-4489;^{1, 2, 3}Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ira_kuchmenova[at]mail.ru)

Предложена: 03.08.2026; Принята: 29.09.2026; Опубликовано: 16.10.2026

Аннотация

Современные климатические изменения и деградация ледников на Центральном Кавказе трансформируют структуру речного стока и гидрохимические процессы, происходящие в них. Моделирование зависимостей между суммой ионов и расходом воды высокогорной части рек затруднено в связи с отсутствием регулярных гидрометрических наблюдений. В работе использованы материалы 10-летнего сезонного мониторинга (2008–2017 гг.) в 23 створах бассейнов рек Чегем, Черек Безенгийский и Черек Балкарский. Для неизученных высокогорных створов расходы воды рассчитаны методом модуля стока с помощью программы ArcGis. Связь между суммой главных ионов ($\Sigma_{\text{ионов}}$) и расходами воды (Q) оценивалась методами корреляционно-регрессионного анализа по трем генетическим типам питания и двум гидрологическим сезонам (летнее половодье и зимняя межень). Установлено, что обобщенный анализ без учета генезиса стока дает исключительно слабую связь ($R^2 \leq 0,20$). Выделение 18 однородных пространственно-временных групп позволило построить надежные степенные регрессионные модели с коэффициентами детерминации ($R^2 = 0,40–0,90$).

Ключевые слова: гидрохимический режим, сумма ионов, расход воды, метод модуля стока, тип водного питания.**THE INFLUENCE OF LANDSCAPE-GENETIC FACTORS ON THE HYDROCHEMICAL REGIME OF THE
HIGH-ALTITUDE TRIBUTARIES OF THE CHEGEM AND CHEREK RIVERS**

Research article

Kuchmenova I.I.^{1,*}, Kondratyeva N.V.², Razumov V.V.³²ORCID : 0000-0001-7313-4489;^{1, 2, 3}High Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russian Federation

* Corresponding author (ira_kuchmenova[at]mail.ru)

Suggested: 03.08.2026; Accepted: 29.09.2026; Published: 16.10.2026

Abstract

Current climate change and glacial degradation in the Central Caucasus are altering the structure of river flow and the hydrochemical processes occurring within rivers. Modelling the relationships between total ion content and water discharge in the upper reaches of rivers is difficult due to the lack of regular hydrometric observations. The work uses data from 10 years of seasonal monitoring (2008–2017) at 23 gauging stations in the Chegem, Cherek Bezengi and Cherek Balkar river basins. For the unexplored high-altitude gauging stations, water discharges were calculated using the discharge module in ArcGIS. The relationship between the sum of major ions (Σ_{ions}) and water discharge (Q) was assessed using correlation and regression analysis methods across three genetic types of water supply and two hydrological seasons (summer flood and winter low-flow). It was found that a generalised analysis that does not take into account the genesis of the flow yields an exceptionally weak relationship ($R^2 \leq 0.20$). The identification of 18 homogeneous spatio-temporal groups enabled the construction of reliable power-law regression models with coefficients of determination ($R^2 = 0.40–0.90$).

Keywords: hydrochemical regime, total ion load, water flow, runoff module method, type of water supply.**Введение**

Высокогорные экосистемы Центрального Кавказа являются наиболее чувствительными индикаторами современных климатических изменений и антропогенных воздействий. Реки Чегем, Черек Безенгийский и Черек Балкарский, которые берут начало в высокогорной ледниковой зоне, играют важную роль в обеспечении водными ресурсами и формировании экологического благополучия предгорных и равнинных территорий Кабардино-Балкарской Республики. В условиях увеличения температуры воздуха и деградации ледников [4] существенно трансформируются структура, внутригодовое распределение и объемы речного стока. Изменение гидрологического режима обуславливает и трансформацию гидрохимических процессов в речных бассейнах [3]. Сумма главных ионов является интегральной характеристикой качества поверхностных вод, которая отражает интенсивность химического выветривания горных пород, растворения минералов и выраженность высотной поясности ландшафтов в формировании ионного стока рек. Важно отметить, что наряду с гидрологическим режимом, фундаментальным ландшафтно-генетическим фактором

является геолого-литологическая структура водосборов. Интенсивность химического выветривания палеозойских гранитоидов, кристаллических сланцев Бокового хребта и юрских карбонатных отложений предопределяет исходный гидрохимический состав поверхностных вод региона. Аналогичные гидродинамические закономерности и эффекты внутрисезонной трансформации минерализации отмечаются исследователями для высокогорных систем Альп и Тянь-Шаня, где фазовые переходы ледников резко меняют ионный баланс. Однако сопряженное математическое моделирование данных процессов для Центрального Кавказа в условиях дефицита данных долгое время оставалось нереализованным.

Целью настоящего исследования является количественная оценка и статистическое моделирование зависимостей между суммой главных ионов и расходами воды в неизученных высокогорных створах притоков рек Чегем и Черек на основе пространственно-временной стратификации данных по ландшафтно-генетическим типам их питания».

Методы и принципы исследования

Информационную базу исследований составили материалы гидрохимического и гидрометрического мониторинга за 10-летний период (2008–2017 гг.). Выбор данного интервала обусловлен тем, что он характеризуется максимальной полнотой и непрерывностью архива сопряженных наблюдений в труднодоступных высокогорных районах. На первом этапе рассчитывались среднесезонные значения суммы главных ионов (Σ ионов) для периодов летнего половодья и зимней межени. В качестве опорных гидрометрических пунктов использовались данные Кабардино-Балкарского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды по замыкающим гидрологическим постам: р. Чегем — с. Нижний Чегем, р. Черек Безенгийский — с. Бабугент и р. Черек Балкарский — с. Бабугент. Ввиду отсутствия постоянно действующих постов Росгидромета в высокогорной зоне, расходы воды непосредственно в пунктах гидрохимического контроля определялись расчетным путем с помощью ГИС-технологий (ArcGIS) методом модуля стока [8], [9] по формулам (1) и (2).

Метод модуля стока заключается в следующем:

1. Если точных данных водных наблюдений по створам нет, а створы это наши точки отбора, необходимо определить:

а) общую площадь бассейна, в нашем случае — это площадь бассейна до гидропоста ($F_{г/п}$, m^2) (вычисляется по топографической карте) (рис. 1);

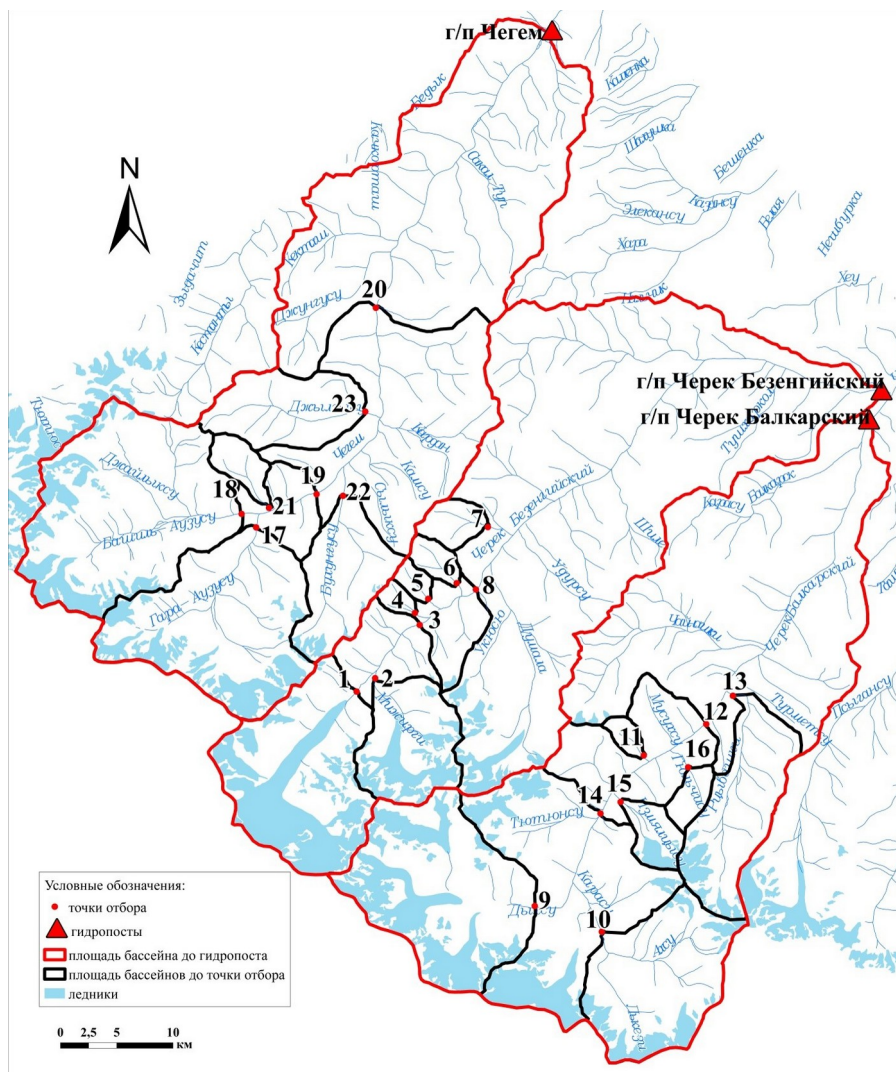


Рисунок 1 - Карта-схема расположения пунктов гидрохимического мониторинга и границы частных водосборов в бассейнах рек Черем, Черек Безенгийский и Черек Балкарский
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.17.1>

б) площадь водосбора притока ($F_{пр}$, м²) — это площадь водосбора притока до точки отбора (вычисляется по топографической карте) (рис. 1).

2. Находим модуль стока (M , м³/(сек м²), количество воды с единицы площади (M), для всего бассейна (до гидропоста), основываясь на данных известного расхода воды на гидропосте ($Q_{г/п}$, м³/сек) и площади бассейна (до гидропоста) ($F_{г/п}$, м²):

$$M = \frac{Q_{г/п}}{F_{г/п}} \quad (1)$$

3. Определяем сток притока ($Q_{пр}$, м³/сек), умножая модуль стока на площадь водосбора притока ($F_{пр}$, м²):

$$Q_{пр} = MF_{пр} \quad (2)$$

Основные результаты

По формулам (1) и (2) мы получили осредненные значения расходов воды притоков для двух фаз водного режима (летнее половодье и зимняя межень) за каждый год с 2008 г. по 2017 г. Затем нами были исследованы по бассейнам Чегем, Черек Безенгийский, Черек Балкарский парные корреляции зависимости суммы ионов ($\Sigma_{ионов}$) от расхода воды, полученные по формуле (2), в каждом притоке (Q_n) по фазам водного режима (зимняя межень, летнее половодье) вне зависимости от типа водного питания. Коэффициенты парной корреляции оказались в пределах: в бассейне Чегема 0,2 за оба сезона, в бассейне Черек Безенгийский 0,2 за оба сезона, в бассейне Черек Балкарский от 0,01 до 0,2.

Силу связи между признаками можно оценить по шкале Чеддока [2]:

0,1 < R < 0,3 — слабая;

0,3 < R < 0,5 — умеренная;

0,5 < R < 0,7 — заметная;

$0,7 < R < 0,9$ — высокая;

$0,9 < R < 1,0$ — весьма высокая.

Используя шкалу Чеддока, мы видим, что связь между суммой ионов и расходами воды, если не учитывать тип водного питания очень слабая, что исключило возможность получения эмпирической зависимости суммы ионов ($\Sigma_{\text{ионов}}$) от расходов воды ($Q_{\text{пр}}$).

При изучении многомерных, многофакторных природных систем на первый план выступают задачи выявления и оценки ведущих факторов, характеризующих системы в целом. Эти задачи решаются с помощью дисперсионного, факторного и компонентного анализов, которые дают возможность свести к минимуму большие комплексы исходных показателей, характеризующие сложные явления, выделив при этом один или несколько главных факторов. Поэтому возникла необходимость разбить массив влияющих факторов (предикторов, в нашем случае среднегодовой расход воды притоков) на группы по типу водного питания с целью выявления возможных увеличивающихся корреляционных связей между зависимой переменной ($\Sigma_{\text{ионов}}$) и воздействующим фактором ($Q_{\text{пр}}$).

Для стратификации массива данных на 18 однородных групп использовались следующие ландшафтно-генетические критерии, адаптированные к условиям высокогорий:

1. Ледниковое питание (преобладающее): притоки, с расположением истоков в зоне современного оледенения (доля ледников в водосборе $>20\%$).

2. Подземное (грунтовое) питание (преобладающее): малые притоки и родниковые выходы, дренирующие водоносные горизонты аллювиальных и трещинно-карстовых комплексов.

3. Смешанное питание: крупные транзитные водотоки, формирующие сток за счет слияния разнородных по генезису притоков, где доли ледниковых, снеговых, дождевых и подземных вод соизмеримы.

В каждой выделенной нами группе, методами математической статистики [1], [5], [7], [10] был проведен корреляционно-регрессионный анализ связи между суммой ионов ($\Sigma_{\text{ионов}}$) и расходами воды ($Q_{\text{пр}}$). При этом были проверены различные аналитические выражения, а нижеприведенная эмпирическая зависимость для вышеуказанных групп речных бассейнов в виде степенной функции:

$$\Sigma_{\text{ионов}}(Q_{\text{пр}}) = aQ_{\text{пр}}^b \quad (3)$$

Необходимое условие при построении регрессионных моделей таково: число включаемых факторов должно быть в 6 раз меньше объема наблюдений, по которым строится регрессия [6], т.е. должно выполняться неравенство: $m \leq n/6$, где m — количество влияющих факторов, n — длина ряда.

Во всех группах неравенство выполняется. Ряды годны для создания регрессионных моделей. В таблице 1 приведены полученные результаты эмпирических зависимостей.

Таблица 1 - Параметры эмпирических уравнений степенной зависимости суммы главных ионов от расходов воды для выделенных ландшафтно-генетических групп

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.17.2>

Тип питания	№ бассейна и название водотока	Уровень доверия	Длина ряда	a - коэффициент	b – степень (Q)	Коэффициент детерминации (R^2)	Сила связи по шкале Чеддока
1	2	3	4	5	6	7	8
Река Чегем							
Летнееполоводье							
- ледниковое (преобладает) - снеговое, - дождевое	17 р. Гара Аузусу	95%	30	43	0,1	0,6	заметная

Тип питания	№ бассейна и название водотока	Уровень доверия	Длина ряда	a - коэффициент	b – степень (Q)	Коэффициент детерминации (R ²)	Сила связи по шкале Чеддока
	18 р. Башиль Аузусу						
	22 р. Булунгу Су						
- подземное (грунтовое) (преобладает) - снеговое, - дождевое	21 р. Баула Су		20	55,22	0,24	0,8	высокая
	23 р. Джилги Су						
- смешанное (ледниковое, снеговое, подземное, дождевое)	19 р. Чегем (6 км после слияния р. Гара Аузусу и р. Башиль Аузусу)		20	178,6	-0,4	0,7	высокая

Тип питания	№ бассейна и название водотока	Уровень доверия	Длина ряда	a - коэффициент	b – степень (Q)	Коэффициент детерминации (R ²)	Сила связи по шкале Чеддока
	20 р. Чегем (25 км после слияния р. Гара Аузусу и р. Башиль Аузусу)						
Зимняя межень							
-ледниковое (преобладает) -снеговое, - дождевое	17 р. Гара Аузусу	95%	30	121,34	0,2	0,6	заметная
	18 р. Башиль Аузусу						
	22 р. Булунгу Су						

Тип питания	№ бассейна и название водотока	Уровень доверия	Длина ряда	a - коэффициент	b – степень (Q)	Коэффициент детерминации (R²)	Сила связи по шкале Чеддока
-подземное (грунтовое) (преобладает) -снеговое, дождевое	21 р. Баула Су		20	97,6	-0,04	0,6	заметная
	23 р. Джилги Су						
-смешанное (ледниковое, снеговое, подземное, дождевое)	19 р. Чегем (6 км после слияния р. Гара Аузусу и р. Башиль Аузусу)		20	126,3	-0,2	0,5	умеренная
	20 р. Чегем (25 км после слияния р. Гара Аузусу и р. Башиль Аузусу)						
Река Черек Безенгийский							

Тип питания	№ бассейна и название водотока	Уровень доверия	Длина ряда	a - коэффициент	b – степень (Q)	Коэффициент детерминации (R ²)	Сила связи по шкале Чеддока
Летнее половодье							
-ледниковое (преобладает) -снеговое, - дождевое	1 Исток р. Черек Безенгийский	95%	20	44,86	0,02	0,7	высокая
	2 р. Мижирги						
-подземное (грунтовое) (преобладает) -снеговое, - дождевое	4 Левый приток 1		40	94,97	0,08	0,5	умеренная
	5 Левый приток 2						

Тип питания	№ бассейна и название водотока	Уровень доверия	Длина ряда	a - коэффициент	b – степень (Q)	Коэффициент детерминации (R²)	Сила связи по шкале Чеддока
	6 Левый приток 3						
	7 Левый приток 4						
-смешанное (ледниковое, снеговое, грунтовое, дождевое)	3 р. Черек Безенгийский (9 км от истока)		20	38,22	0,2	0,4	умеренная
	8 р. Черек Безенгийский (14 км от истока)						
Зимняя межень							



Тип питания	№ бассейна и название водотока	Уровень доверия	Длина ряда	a - коэффициент	b – степень (Q)	Коэффициент детерминации (R²)	Сила связи по шкале Чеддока
-ледниковое (преобладает) -снеговое, - дождевое	1 Исток р. Черек Безенгийский	95%	20	119,07	0,3	0,7	заметная
	2 р. Мижирги						
-подземное (грунтовое) (преобладает) -снеговое, - дождевое	4 Левый приток 1		40	108,64	-0,1	0,5	умеренная
	5 Левый приток 2						
	6 Левый приток 3						

Тип питания	№ бассейна и название водотока	Уровень доверия	Длина ряда	a - коэффициент	b – степень (Q)	Коэффициент детерминации (R²)	Сила связи по шкале Чеддока
	7 Левый приток 4						
-смешанное (ледниковое, снеговое, подземное, дождевое)	3 р. Черек Безенгийский (9 км от истока)		20	114,71	-0,13	0,4	умеренная
	8 р. Черек Безенгийский (14 км от истока)						
Река Черек Балкарский							
Летнее половодье							

Тип питания	№ бассейна и название водотока	Уровень доверия	Длина ряда	a - коэффициент	b – степень (Q)	Коэффициент детерминации (R ²)	Сила связи по шкале Чеддока
-ледниковое (преобладает) -снеговое, - дождевое	9 р. Дыхсу	95%	40	53,47	0,1	0,4	умеренная
	10 р. Карасу						
	15 р. Измылцы Су						
	13 р. Рцывашки						
-подземное (грунтовое) (преобладает) - снеговое, -	11 р. Тютюнсу		20	91,16	0,05	0,4	умеренная

Тип питания	№ бассейна и название водотока	Уровень доверия	Длина ряда	a - коэффициент	b – степень (Q)	Коэффициент детерминации (R²)	Сила связи по шкале Чеддока
дождевое	16 р. Гюльчи Су						
-смешанное (ледниковое, снеговое, подземное, дождевое)	14 р. Черек Балкарский (25 км от истока)		20	61,18	-0,05	0,4	умеренная
	12 р. Черек Балкарский (29,5 км от истока)						
Зимняя межень							
-ледниковое (преобладает) -снеговое, - дождевое	9 р. Дыхсу	95%	40	143,71	0,1	0,4	умеренная

Тип питания	№ бассейна и название водотока	Уровень доверия	Длина ряда	a - коэффициент	b – степень (Q)	Коэффициент детерминации (R ²)	Сила связи по шкале Чеддока
	10 р. Карасу						
	15 р. Измылцы Су						
	13 р. Рцывашки						
-подземное (грунтовое) (преобладает) -снеговое, - дождевое	11 р. Тютюнсу		20	29,1	-0,6	0,9	высокая
	16 р. Гюльчи Су						



Тип питания	№ бассейна и название водотока	Уровень доверия	Длина ряда	a - коэффициент	b – степень (Q)	Коэффициент детерминации (R^2)	Сила связи по шкале Чеддока
-смешанное (ледниковое, снеговое, подземное, дождевое)	14 р. Черек Балкарский (25 км от истока)		20	43,62	0,7	0,5	умеренная
	12 р. Черек Балкарский (29,5 км от истока)						

Коэффициенты множественной детерминации (R^2) для полученных выражений составляют от 0,4 до 0,9 в зависимости от типа питания реки и водного режима. Это означает, что 40–90% изменения значений показателя суммы ионов ($\Sigma_{\text{ионов}}$) обусловлено изменением показателя расходов воды ($Q_{\text{пр}}$). Относительная ошибка в уравнениях меняется от 5% до 15%.

Заключение

Представленные в таблице 1 результаты математического моделирования подтверждают высокую эффективность предложенного метода пространственно-временной стратификации данных. Переход от обобщенного анализа речных бассейнов к изолированным ландшафтно-генетическим группам позволил существенно снизить стохастическую погрешность. Коэффициенты детерминации (R^2) для подавляющего большинства разработанных моделей находятся в диапазоне 0,40–0,90, что указывает на высокую долю объясненной дисперсии и подтверждает определяющую роль гидрологического фактора в формировании ионного стока притоков при условии однородности источников их питания.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Андронов А.М. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник для вузов / А.М. Андронов — Санкт-Петербург: Питер, 2004. — 461 с.
2. Бараз В.Р. Корреляционно-регрессионный анализ связи показателей коммерческой деятельности с использованием программы Excel / В.Р. Бараз — Екатеринбург: Уральский государственный технический университет — УПИ, 2005. — 102 с.
3. Кучменова И.И. многолетние изменения минерализации и расходов воды рек бассейна терека / И.И. Кучменова, Ф.А. Атабиева // География и природные ресурсы. — 2024. — Т. 45. — № 2. — С. 94–100.
4. Кучменова И.И. Анализ химического состава вод рек кабардино-балкарского государственного природного высокогорного заповедника / И.И. Кучменова, Н.В. Кондратьева // Грозненский естественнонаучный бюллетень. — 2025. — Т. 10. — № 2 (40). — С. 36–46.
5. Никаноров А.М. Гидрохимия: Учебник / А.М. Никаноров. — Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2001. — 444 с.
6. Просветов Г.И. Эконометрика. Задачи и решения: учебно-методическое пособие / Г.И. Просветов. — Москва: РДЛ, 2005. — 104 с.
7. Самнер Г. Математика для географов / Г. Самнер. — Москва: Прогресс, 1981. — 29 с.
8. СП 33-101-2003 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик».
9. Чеботарев А.И. Инструкция по определению расчетных характеристик дождевых селей / А.И. Чеботарев. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1976. — 27 с.
10. Шмайлова Р.А. Общая теория статистики / Р.А. Шмайлова. — Москва: Финансы и статистика, 2002. — 255 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Andronov A.M. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika: Uchebnik dlya vuzov [Probability Theory and Mathematical Statistics: Textbook for Universities] / A.M. Andronov — St. Petersburg: Piter, 2004. — 461 p. [in Russian]
2. Baraz V.R. Korrelyacionno-regressionnyj analiz svyazi pokazatelej kommercheskoj deyatel'nosti s ispol'zovaniem programmy Excel [Correlation and regression analysis of the relationship between indicators of commercial activity using the Excel program] / V.R. Baraz — Yekaterinburg: Ural State Technical University — UPI, 2005. — 102 p. [in Russian]
3. Kuchmenova I.I. mnogoletnie izmeneniya mineralizacii i rasxodov vody' rek bassejna tereka [Long-term changes in mineralization and water discharge in the rivers of the Terek basin] / I.I. Kuchmenova, F.A. Atabieva // Geography and natural resources. — 2024. — Vol. 45 — № 2. — P. 94–100. [in Russian]
4. Kuchmenova I.I. Analiz ximicheskogo sostava vod rek kabardino-balkarskogo gosudarstvennogo prirodnogo vy'sokogornogo zapovednika [Analysis Of The Chemical Composition Of The Rivers' Waters In The Kabardino-Balkarian State Nature High-Mountain Reserve] / I.I. Kuchmenova, N.V. Kondrat'eva // Grozny Natural Science Bulletin. — 2025. — Vol. 10. — № 2 (40). — P. 36–46. [in Russian]
5. Nikanorov A.M. Gidroximiya: Uchebnik [Hydrochemistry: Textbook] / A.M. Nikanorov. — St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2001. — 444 p. [in Russian]
6. Prosvetov G.I. Ekonometrika. Zadachi i resheniya: uchebno-metodicheskoe posobie [Econometrics. Problems and Solutions: a teaching aid] / G.I. Prosvetov. — Moscow: RDL, 2005. — 104 p. [in Russian]
7. Sumner G. Matematika dlya geografov [Mathematics for geographers] / G. Samner. — Moscow: Progress, 1981. — 29 p. [in Russian]



8. SP 33-101-2003 «Opredelenie osnovnyh raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik» [SP 33-101-2003 “Determination of the main calculated hydrological characteristics”] [in Russian]
9. Chebotarev A.I. Instrukciya po opredeleniyu raschetnyh harakteristik dozhdevykh selej [Instructions for determining the design characteristics of rain mudflows] / A.I. Chebotarev. — Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976. — 27 p. [in Russian]
10. Shmaylova R.A. Obshchaya teoriya statistiki [General theory of statistics] / R.A. Shmaylova. — Moscow: Finance and Statistics, 2002. — 255 p. [in Russian]