УДК 631.587(575.1) https://doi.org/10.5281/zenodo.18033599

Чембарисов Э.И.[1], Баллиев А.И.[2], Реймова Г.Б.[1]

[1]Научно-исследовательский институт ирригации и водных проблем, Ташкент, Узбекистан
[2]Международный центр стратегических разработки исследований в области продовольствия и сельского хозяйства (I-SCAD) при Министерстве сельского хозяйства Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ГЛАВНЫХ ИОНОВ В ВОДЕ ПРИ ИЗВЕСТНОЙ ВЕЛИЧИНЕ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

Аннотация. *В исследовании проанализированы данные химического анализа воды нижнего течения реки Амударьи, магистральных коллекторов и малых локальных озер в Республике Каракалпакстан за 2022-2023 гг. Цель исследования заключалась в анализе химического состава поверхностных вод Республики Каракалпакстан и выводе эмпирических зависимостей содержания главных ионов (HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+) от величины минерализации. Анализ химического состава речной воды показал, что при движении речной воды от верховий к низовьям преобладающий химический состав изменяется с гидрокарбонатно-сульфатного–кальциево-натриевого (ГС-КН) на хлоридно-сульфатный–магниево-кальциево-натриевый (ХС-МКН). Полученные уравнения имеют тесную связь с исходными данными (коэффициенты детерминации R^2 = 0,80…0,94). В воде рассмотренных коллекторов КС-1, КС-3, КС-4 и ККС среди анионов преобладает сульфатный ион, на втором месте – хлоридный ион, на третьем – гидрокарбонатный ион. При этом преобладающий химический состав хлоридно-сульфатный-магниево-кальциево-натриевый (ХС-МКН). Такой же химический состав наблюдается в воде озер Судочье, Междуречье, Каратерень, Жилтырбас.*

Ключевые слова: *Амударья, магистральные коллектора, малые локальные озера, главные ионы, минерализация, Аральское море, Центральная Азия, экология.*

Chembarisov E.I.[1], Balliyev A.I.[2], Reymova G.B.[1]

[1]Research Institute of Irrigation and Water Problems, Tashkent, Uzbekistan
[2]International Centre for Food and Agriculture Strategic Development and Research (I-SCAD) under the Ministry of Agriculture of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

PREDICTING THE CONTENT OF MAJOR IONS IN WATER GIVEN A KNOWN MINERALIZATION VALUE

Abstract. *The study utilized data from chemical analyses of water from the lower reaches of the Amu Darya River, main collectors, and small local lakes in the Republic of Karakalpakstan for 2022-2023. The aim of the research was to analyze the chemical composition of surface waters in the Republic of Karakalpakstan and derive empirical relationships for assessing the content of major ions (HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+) based on the level of mineralization. Analysis of the river water's chemical composition revealed that as the water flows from the upper to the lower reaches, the predominant chemical composition changes from hydrocarbonate-sulfate-calcium-sodium (HS-CN) to chloride-sulfate-magnesium-calcium-sodium (CS-MCN). The derived equations show a strong correlation with the initial data (determination coefficients R^2 = 0.80...0.94). In the water of the examined collectors KS-1, KS-3, KS-4, and KKS, the sulfate ion dominates among anions, followed by the chloride ion, and then the hydrocarbonate ion. The predominant chemical composition is chloride-sulfate-magnesium-calcium-sodium (CS-MCN), which is also observed in the waters of the small local lakes Sudochye, Mezhdurechye, Karateren, and Zhyltyrbas.*

Key words: *Amu-Darya, main canals, small local lakes, main ions, mineralization, Aral Sea, Central Asia, ecology.*

Введение и постановка проблемы. Аральское море, расположенное в Центральной Азии, претерпело значительные изменения площади поверхности из-за совокупного воздействия изменения климата и деятельности человека. Это сокращение привело к региональному экологическому кризису и серьезным последствиям [25]. Высыхание Аральского моря в настоящее время вызывает комплекс негативных процессов в этом регионе: изменение экосистемы самого моря, усиление континентальности климата, опустынивание и деградацию пастбищ и орошаемых земель, загрязнение и истощение имеющихся водных ресурсов. Аральское море стало масштабной техногенной экологической и гуманитарной катастрофой. Его современная регрессия была вызвана в первую очередь нерациональным использованием водных ресурсов для орошения. Однако, некоторые ученые полагают, что подобное могло происходить в прошлом из-за изменчивости стоков Амударьи и Сырдарьи [22]. В то же время высыхание Аральского моря усугубляется изменением климата и увеличением фактической эвапотранспирации [23].

Анализ существующих материалов показал, что при этом изменились магистральные коллектора и лимнические экосистемы (озера и различные водоемы) из-за непоступления в них речного стока в отдельные годы. В некоторых водоемах изменился источник питания. Часто вместо поступления речного стока р. Амударьи, в них стали попадать коллекторно-дренажные стоки с орошаемых территорий. В связи с этим возникла необходимость изучения не только гидрологических, но и гидрохимических характеристик магистральных коллекторов и различных водоемов отмеченного региона [4–20].

Научно-практическая значимость результатов представляемой работы заключается в том, что полученные эмпирические зависимости позволяют оценить содержание главных ионов по известной величине минерализации. Это может быть полезным при отсутствии у исследователя возможности оценить концентрации анионов и катионов. При наличии цифрового тестера TDS-метра для оценки общего количества растворенных в воде солей.

Изученность вопроса. Различные гидрологические и гидрохимические характеристики коллекторно-дренажных вод Республики Каракалпакстан в прошедшие годы изучались многими учёными, в частности, А.У. Усмановым [15], Э.И. Чембарисовым [4,14,18,19], Б.А. Бахритдиновым [18], Ч.А. Абдировым [1], М.А. Якубовым [20], Б.Е. Аденбаевым [2,3], Ф.Х. Хикматовым [2]. Среди исследований гидрологических и гидрохимических характеристик озер дельты Амударья следует отметить работы Ч.А. Абдирова [1], Д. Ешимбаева [6], Б.Е. Аденбаева [2,3], А.Р. Курбанова [8], С.Б. Калабаева [3,7], Д.Н. Жангабаева [7].

В монографии Н.Н. Ходжибаева и В.Г. Сомойленко [16] приведена систематизация методов оценки гидрогеологических параметров (гидрохимические и фильтрационные) на базе гидрорежимной информации. Параметры оцениваются в свете дальнейшего использования их для обоснования прогнозов, поэтому особое внимание уделено принципам выбора расчетных значений параметров с учетом вероятной изменчивости под влиянием орошения земель и за счет естественной неоднородности геолого-гидрогеологических полей.

В монографии О.Д. Мурадова, Г.Ю. Валукониса, Ш.О. Мурадова [9] освещены вопросы эффективного и рационального использования орошаемых земель и оросительной воды, пути совершенствования коллекторно-дренажной сети. Авторами впервые изучены некоторые закономерности метаморфизации химического состава грунтовых вод в связи с орошением, предпринят прогноз вторичного засоления почв.

Н.Н. Ходжибаев, Л.З. Шерфединов [17], изучая вопросы гидрогеологического прогнозирования в аридных областях, приводят новую логико-математическую модель гидрогеологического процесса орошаемых массивов и на ее основе оценивают изменение гидрохимической обстановки в ряде районов аридной зоны.

Л.Н. Горев, В.И. Пелешенко [5] при описании предлагаемого математического моделирования влияния орошения на гидрохимический режим речного бассейна отмечают, что методы прогнозирования основаны на математическом моделировании процессов перемещения солей в толще активного водообмена, на сравнении величин стока ионов в створах, расположенных выше и ниже оросительной системы (бассейновый метод) и на вероятностно-статистическом анализе данных о химическом составе речных вод за длительный промежуток времени в створах, расположенных ниже орошаемых земель. При этом количественная оценка влияния оросительных мелиораций на ионный состав речных вод выполняется с помощью комплекса предельных величин, значения которых находятся экспериментально и путем математического моделирования процессов перемещения солей в толще активного водосолеобмена с учетом солеотдачи пород под влиянием инфильтрации природных и оросительных вод.

В диссертации А.И. Сергеева [13] создана математическая модель системы «Река-орошаемая территория», описывающая взаимодействие ирригационной системы и рек. Адекватность модели, принятые гипотезы и эвристические соображения при её построении проверены на примере речных бассейнов Сырдарьи (Ферганская долина, Чирчик-Ахангаранский ирригационный район (ЧАКИР)) и Мургаба (Мургабский оазис).

В упомянутых публикациях различных авторов, в основном, приведены гидрологические и гидрохимические данные по коллекторным водам Южного Приаралья за прошедшие годы, перед авторами же стояла задача выполнить анализ гидрохимической ситуации за период 2022–2023 гг., а также описать способ прогнозирования содержания главных ионов при известной величине минерализации.

Цель и задачи работы. Цель исследования заключалась в анализе химического состава поверхностных вод Республики Каракалпакстан и выводе эмпирических зависимостей для оценки содержания главных ионов.

В основные задачи исследований входило:

- определение прогнозных зависимостей содержания главных ионов при известной величине минерализации для следующих гидропостов р.Амударьи: Туямуюн, Кипчак, Саманбай, Кызылджар;
- определение прогнозных зависимостей содержания главных ионов при известной величине минерализации для магистральных коллекторов КС-1, КС-3, КС-4, ККС;
- определение прогнозных зависимостей содержания главных ионов при известной величине минерализации для малых локальных озер (Судочье, Междуречье, Каратерень (восточный), Жилтырбас).

Материалы и методы исследования. В настоящем исследовании была использована база данных Научно-исследовательского института ирригации и водных проблем по изменению водного и гидрохимического режима речных и коллекторно-дренажных вод бассейна Аральского моря, данные гидрохимического анализа вод нижнего течения реки Амударьи, магистральных коллекторов КС-1, КС-3, КС-4, ККС и малых локальных озер (Судочье, Междуречье, Каратерень (восточный), Жилтырбас) за 2022–2023 гг. Путем статистической обработки этих данных получены уравнения зависимости содержания главных ионов (HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+) от величины минерализации М. Обработка данных и графическое оформление результатов исследования выполнены в электронных таблицах Microsoft Office Excel (ver. 16.10 Build 180124 (2018)).

При оценке перспективных изменений качества речных вод различными исследователями применяется гидрологический подход, при котором взаимоотношения в объекте «речная система – орошаемая территория» рассматриваются через результирующие показатели изменчивости стока в основной реке. Наиболее детально этот подход освещен в работах Ф.Э. Рубиновой [10,11,12].

Одним из существующих методов прогнозирования качества речных вод является бассейновый ландшафтно-галогеохимический метод (разработан И.Н. Степановым и Э.И. Чембарисовым) [14, 18].

При этом для расчета перспективной интегральной среднегодовой величины минерализации в замыкающих створах рек применяется следующая рабочая формула:

$$M_{ор}=M_{нач}+aF_{эф},$$

где $M_{ор}$ и $M_{нач}$ – минерализация речной воды ниже и выше орошаемой площади в бассейне или ирригационном районе,

$F_{эф}$ – эффективная, т. Ее дренируемая рекой часть орошаемой площади (в условиях Средней Азии это, в первую очередь, площади, занятые хлопчатником, рисом и т.д.),

А – коэффициент, учитывающий в интегральной форме солеотдачу в различной степени засоленных орошаемых почв (с присущими им грунтовыми водами), модуль коллекторного стока и расходы воды в реке.

Этот метод расчета, основанный на взаимосвязи минерализации речной воды с величиной орошаемой площади различного засоления при одновременном учете минерализации грунтовых вод (формирование минерализации речных вод в орошаемой зоне рассматривается площадным способом за пределами русла), и вошел в практику под названием бассейнового ландшафтно-галогеохимического метода.

Результаты и их обсуждение. *Анализ химического состава речной воды.* Проведен анализ изменения качества воды в низовьях р. Амударьи, сток которой используется для орошения сельскохозяйственных культур. В низовьях реки у гидропоста г. Нукус (кишл. Саманбай) среди анионов преобладает сульфат-ион SO_4^{2-}, на втором месте – хлорид-ион Cl^-, на третьем – гидрокарбонат-ион HCO_3^-. В пробах воды у гидропоста кишл. Кызылджар среди анионов преобладает сульфат-ион SO_4^{2-}, на втором месте – хлорид-ион Cl^-, содержание гидрокарбонат-иона HCO_3^- было незначительным. Можно установить, что при движении речной воды от верховий к низовьям преобладающий химический состав изменяется с гидрокарбонатно-сульфатного–кальциево-натриевого (ГС–КН) на хлоридно-сульфатный–магниево-кальциево-натриевый (ХС–МКН). В результате математической обработки данных получены математические зависимости содержания главных ионов от величины минерализации воды (табл. 1, рис. 1). По приведенным уравнениям можно определить содержание отдельных ионов (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-}, в мг/л) при известной величине минерализации (М, в мг/л) воды.

Таблица 1

Уравнения зависимостей содержания главных ионов от величины минерализации (в мг/л) воды в гидропостах низовьев р. Амударья

Наименование гидропостов	Анионы	R^2	Катионы	R^2
Туямуюн	SO_4^{2-} = 0,2457M+84,718	0,86	Na^+ = 0,0315M+92,871	0,49
	Cl^- = 0,0992M+44,756	0,94	Ca^{2+} = 0,0654M+41,652	0,62
	HCO_3^- = 0,1005M+83,139	0,94	Mg^{2+} = 0,0363M+1,0871	0,96
Кипчак	SO_4^{2-} = 0,4924M-99,94	0,99	Na^+ = 0,1431M+22,071	0,73
	Cl^- = 0,1753M-14,738	0,99	Ca^{2+} = 0,0829M+0,7	0,92
	HCO_3^- = 0,036M+112,02	0,30	Mg^{2+} = 0,0693M+19,771	0,75
Саманбай	SO_4^{2-} = 0,458M-73,151	0,98	Na^+ = 0,1848M-21,512	0,83
	Cl^- = 0,1909M-27,851	0,98	Ca^{2+} = 0,0689M+20,033	0,71
	HCO_3^- = 0,0428M+109,81	0,42	Mg^{2+} = 0,0546M-7,3279	0,77
Кызылджар	SO_4^{2-} = 0,3827M - 25,763	0,82	Na^+ = 0,2021M - 38,744	0,97
	Cl^- = 0,2177M - 50,377	0,98	Ca^{2+} = 0,0599M+26,631	0,86
	HCO_3^- = 0,0176M + 132,76	0,57	Mg^{2+} = 0,0529M-3,8975	0,97

Таблица составлена авторами по результатам собственных расчётов.

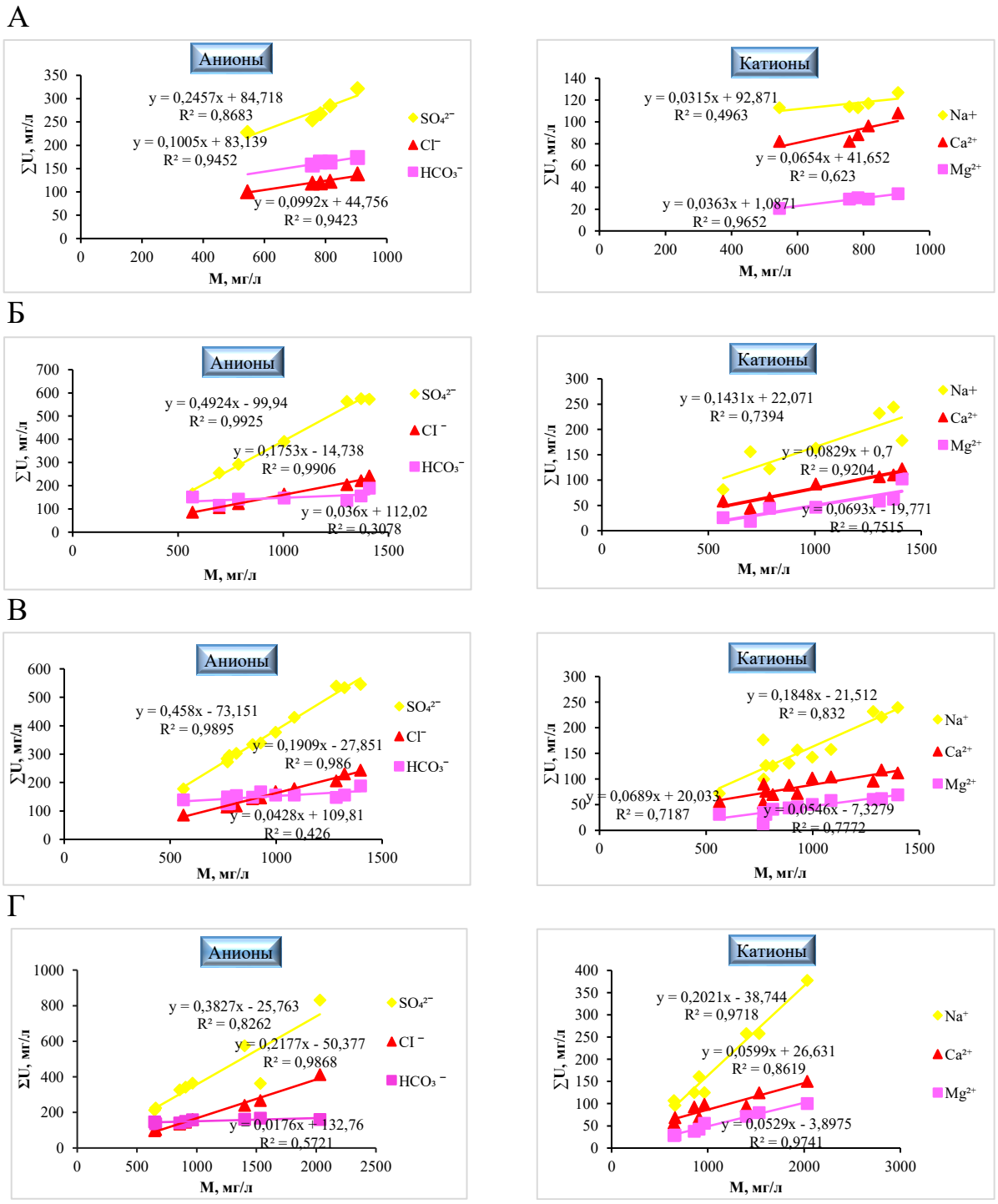


Рис. 1. Графики зависимости содержания главных ионов (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, HCO_3^{-}, Cl^{-}, SO_4^{2-}) от величины минерализации на различных гидропостах р. Амударья за 2022 г: А) Туямуюн, Б) Кипчак, В) Саманбай, Г) Кызылджар

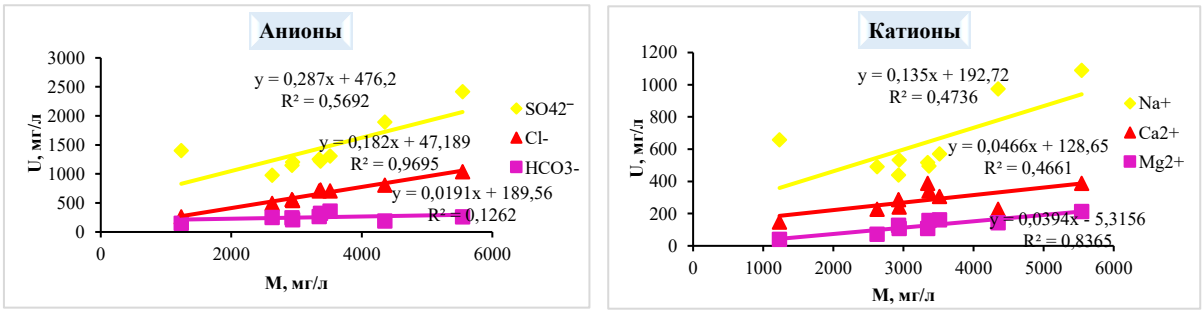
Рисунок составлен авторами по результатам собственных расчётов.

Проведенные расчеты показали, что при ожидаемой величине минерализации (М, мг/л) речной воды Амударьи, равной 2000 мг/л, на гидропосту Туямуюн следует ожидать следующие величины содержания главных ионов (в мг/л): HCO_3^{-} =283; SO_4^{2-} =565; Cl^{-} =243; Ca^{2+} =172; Mg^{2+} =73; Na^{+} =155; на посту Кипчак: HCO_3^{-} =184; SO_4^{2-} =880; Cl^{-} =325; Ca^{2+} =165; Mg^{2+} =158; Na^{+} =302; на посту Саманбай: HCO_3^{-} =195; SO_4^{2-} =827; Cl^{-} =352; Ca^{2+} =158; Mg^{2+} =102; Na^{+} =348. на посту Кызылджар: HCO_3^{-} =168; SO_4^{2-} =740; Cl^{-} =385; Ca^{2+} =146; Mg^{2+} =102; Na^{+} =365.

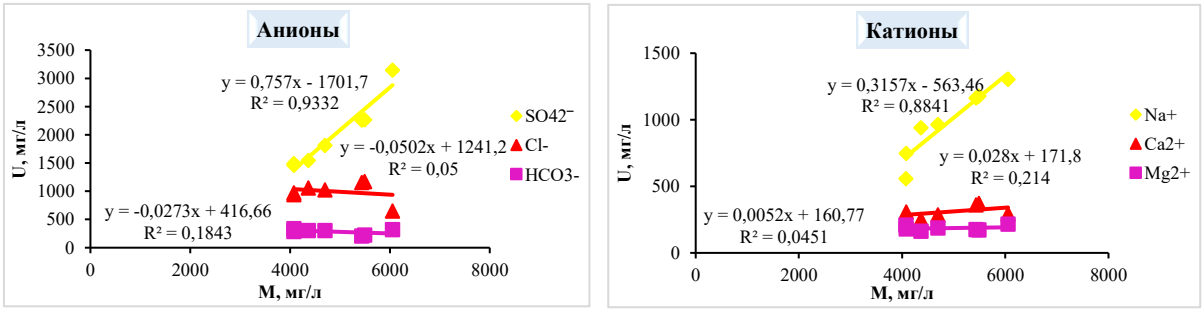
Анализ проб воды, показал, что величину минерализации в основном определяют анионы, так как их концентрация выше, чем катионов. Поэтому связь анионов с величиной минерализации более тесная (коэффициент детерминации R^2 у анионов больше, чем у катионов). Коэффициенты детерминации у анионов находятся в диапазоне 0,30…0,99 с медианным значением $R_1^2 = 0,94$. У катионов же они находятся в диапазоне 0,49…0,97 с медианным значением $R_2^2 = 0,80$. Таким образом, $R_1^2 > R_2^2$.

Анализ зависимости химического состава коллекторной воды. Авторами были проанализированы математические зависимости содержания главных ионов (HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+) от величины минерализации (М) и получены уравнения их связи для воды магистральных коллекторов КС-1, КС-3, КС-4, ККС (рис. 2 и табл. 2).

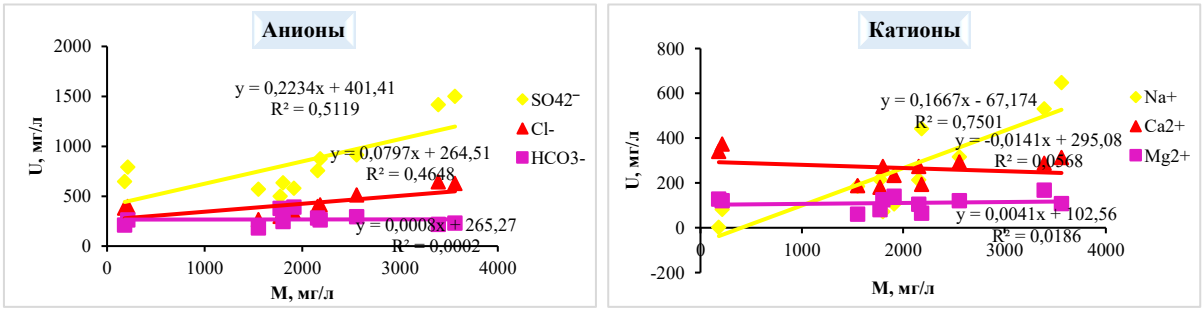
А



Б



В



Г

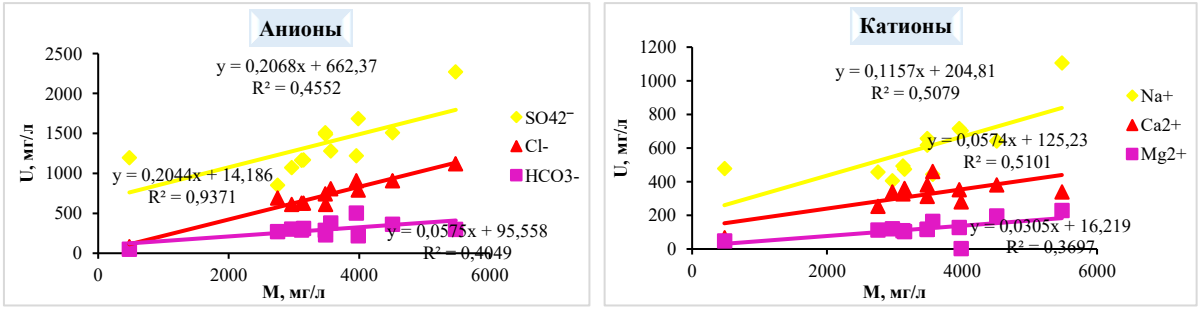


Рис. 2. Графики зависимости содержания главных ионов (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-}) от величины минерализации (М) магистральных коллекторов за 2023 год: А) КС-1, Б) КС-3, В) КС-4 и Г) ККС

Рисунок составлен авторами по результатам собственных расчётов.

Таблица 2

Уравнения зависимостей содержания главных ионов от величины минерализации (в мг/л) воды в магистральных коллекторах

Наименование коллекторов	Анионы	R^2	Катионы	R^2
КС-1	SO_4^{2-} = 0,287М+476,2	0,56	Na^+ = 0,135М+192,72	0,47
	Cl^- = 0,182М+47,189	0,96	Ca^{2+} = 0,0466М+128,65	0,46
	HCO_3^- = 0,0191М + 189,56	0,12	Mg^{2+} = 0,0394М-5,3156	0,83
КС-3	SO_4^{2-} = 0,757М-1701,7	0,93	Na^+ = 0,3157М-563,46	0,88
	Cl^- = 0,0502$М^2$ +1241	0,05	Ca^{2+} = 0,028М + 171,8	0,21
	HCO_3^- = -0,0273М+416,66	0,18	Mg^{2+} = 0,0052М + 160,77	0,04
КС-4	SO_4^{2-} = 0,2234М + 401,41	0,51	Na^+ = 0,1667М-67,174	0,75
	Cl^- = 0,0797М+264,51	0,46	Ca^{2+} = 0,0141М + 295	0,05
	HCO_3^- = 0,0008М + 265	0,0002	Mg^{2+} = 0,0041М + 103	0,001
ККС	SO_4^{2-} =0,2068М+662,37	0,45	Na^+ =0,1157М+204,81	0,50
	Cl^- =0,2044М+14,186	0,93	Ca^{2+} =0,0574М+125,23	0,51
	HCO_3^-=0,0575М+95,558	0,40	Mg^{2+} =0,0305М+16,219	0,36

Таблица составлена авторами по результатам собственных расчётов.

В воде коллекторов КС-1, КС-3, КС-4 и ККС среди анионов преобладает сульфатный ион, на втором месте – хлоридный ион, на третьем месте – гидрокарбонатный ион. При этом преобладающий химический состав – хлоридно-сульфатный – магниево-кальциево-натриевый (ХС-МКН).

По приведенным уравнениям можно определить содержание отдельных ионов (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-} в мг/л), при известной величине минерализация воды (М, мг/л) в коллекторах. В качестве примера, проведен расчет ожидаемого изменения содержания главных ионов на примере коллектора ККС. Если считать, что величина минерализации (М, мг/л) воды коллектора будет равна 4000 мг/л, то, по расчетам по предложенным уравнениям, получены следующие величины содержания главных ионов (в мг/л): HCO_3^- =325,6; SO_4^{2-} =1489,6; Cl^- =831,8; Ca^{2+} =354,8; Mg^{2+}=138,2; Na^+ =667,6.

Анализ проб воды и полученных зависимостей показывает, что связь данных средняя. Коэффициенты детерминации у анионов находятся в диапазоне 0,18…0,96 с медианным значением $R_1^2 = 0{,}485$. Коэффициенты детерминации у катионов находятся в диапазоне 0,22…0,88 с медианным значением $R_2^2 = 0{,}485$. Таким образом, $R_1^2 \approx R_2^2$.

Наибольшая нестабильность связи у гидрокарбонат-иона HCO_3^- (коэффициент детерминации в диапазоне 0,18…0,40), а наиболее выраженная связь у хлорид-иона Cl^- (0,46…0,96). Из катионов наиболее выраженная связь у натрий-иона Na^+ (0,47…0,88), наименее – у магний-иона Mg^{2+} (0,27…0,47). Это выражается в названии вод. Такую лабильность можно объяснить тем, что на коллекторный сток существенное влияние оказывает мелиорация. На полях, кроме орошения, также применяется капитальная промывка. В некоторых районах капитальная промывка засоленных почв требуется два раза в год.

Анализ зависимости химического состава озерной воды. Были проанализированы математические зависимости содержания главных ионов (HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+) от величины минерализации (М) и получены уравнения их связей для малых локальных водоемов Судочье, Междуречье, Каратерень, Жилтырбас (рис. 3 и табл. 3).

В воде рассмотренных локальных водоемов среди анионов преобладает сульфатный ион (SO_4^{2-}), на втором месте – хлоридный ион (Cl^-), на третьем – гидрокарбонатный ион (HCO_3^-). При этом преобладающий химический состав хлоридно-сульфатный – магниево- кальциево-натриевый (ХС-МКН).

По приведенным уравнениям можно определить содержание отдельных ионов (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-} в мг/л), при известной величине минерализации воды

(М, мг/л) в малых локальных водоемов. В качестве примере, проведен расчета ожидаемого изменения содержания главных ионов на примере озере Судочье, если в перспективе. Если считать, что величина минерализации (М, мг/л) в воде озере будут равна 3000 мг/л, то по приведенным расчетам по предложенным уравнениям получим следующие величины содержания главных ионов (в мг/л): HCO_3^- =339; SO_4^{2-} =1076,1; Cl^- =618; Ca^{2+} =296; Mg^{2+}=114; Na^+ =480.

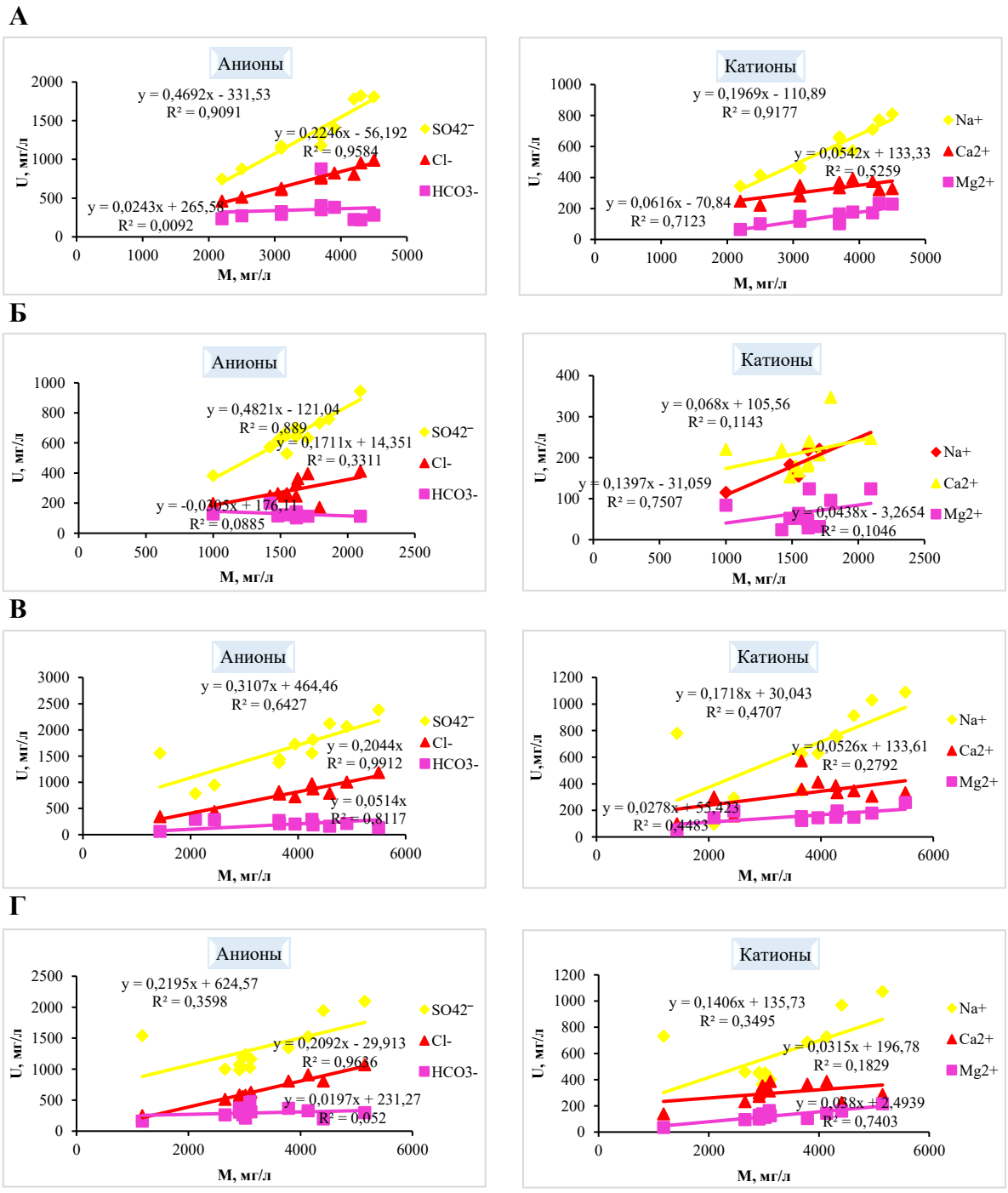


Рис. 3. Графики зависимости содержания главных ионов (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-}) от величины минерализации (М) малых локальных водоемов за 2023 г: А) Судочье, Б) Междуречье, В) Каратерень, Г) Жилтырбас

Рисунок составлен авторами по результатам собственных расчётов.

Таблица 3

Уравнения зависимостей содержания главных ионов от величины минерализации (в мг/л) воды в малых локальных водоемов

Наименование водоемов	Анионы	R^2	Катионы	R^2
Судочье	SO_4^{2-} = 0,4292М – 331,53	0,90	Na^+ = 0,1969М – 110,89	0,92
	Cl^- = 0,2246М – 56,192	0,95	Ca^{2+} = 0,0542М + 133,33	0,53
	HCO_3^- = 0,0243М + 265,58	0,0092	Mg^{2+} = 0,0616М – 70,84	0,71
Междуречье	SO_4^{2-} = 0,4821М + 121,04	0,89	Na^+ = 0,068М + 105,56	0,11
	Cl^- = 0,1711М + 14,351	0,33	Ca^{2+} = 0,1397М + 31,059	0,75
	HCO_3^- = 0,0305М + 176,11	0,09	Mg^{2+} = 0,0438М – 3,2654	0,10
Каратерень	SO_4^{2-} = 0,3107М + 464,46	0,64	Na^+ = 0,1718М + 30,043	0,47
	Cl^- = 0,2044М	0,99	Ca^{2+} = 0,0526М + 133,61	0,28
	HCO_3^- = 0,0514М	0,81	Mg^{2+} = 0,0278М + 55,423	0,45
Жилтырбас	SO_4^{2-} = 0,2195М + 624,57	0,36	Na^+ = 0,1406М + 135,73	0,35
	Cl^- = 0,2092М – 29,913	0,96	Ca^{2+} = 0,0315М + 196,78	0,18
	HCO_3^- = 0,0197М + 231,27	0,052	Mg^{2+} = 0,038М + 2,4939	0,74

Таблица составлена авторами по результатам собственных расчётов.

Анализ проб воды и полученных зависимостей показывает, что связь величин средняя. Коэффициенты детерминации у анионов находятся в диапазоне 0,10…0,96 с медианным значением $R_1^2 = 0,53$. Коэффициенты детерминации у катионов находятся в диапазоне 0,10…0,91 с медианным значением $R_2^2 = 0,545$. Таким образом, $R_1^2 \approx R_2^2$. Наибольшая нестабильность связи у гидро-карбонат-иона HCO_3^- (коэффициент детерминации в диапазоне 0,10…0,42), а наиболее выраженная связь – у сульфат-иона SO_4^{2-} (0,35…0,90). Из катионов наиболее выраженная связь у магний-иона Mg^{2+} (0,44…0,75), наименее выраженная – у кальций-иона Ca^{2+} (0,10…0,57). Такую лабильность можно объяснить тем, что локальные озера имеют сток с ограниченных водосборов, существенное влияние на который оказывают местные условия.

Выводы. Анализ химического состава речной воды показал, что при движении речной воды от верховий к низовьям преобладающий химический состав изменяется с гидрокарбонатно-сульфатного – кальциево-натриевого (ГС–КН) на хлоридно-сульфатный – магниево-кальциево-натриевый (ХС–МКН), полученные уравнения имеют тесную связь с исходными данными (коэффициенты детерминации $R^2 = 0,80…0,94$).

Анализ химического состава воды из магистральных коллекторов показал, что связь данных содержания главных ионов с минерализацией средняя ($R^2 \approx 0,5$), преобладающий тип химического состава вод – хлоридно-сульфатный – магниево-кальциево-натриевый (ХС–МКН). Лабильность концентраций некоторых ионов, например, HCO_3– и Mg^{2+} можно объяснить тем, что на коллекторный сток существенное влияние оказывает мелиорация.

Анализ химического состава озерных вод показал, что связь данных средняя ($R^2 \approx 0,5$), преобладающий тип химического состава – хлоридно-сульфатный–магниево-кальциево-натриевый (ХС–МКН). Лабильность концентраций некоторых ионов, например, HCO_3– и Ca^{2+}, можно объяснить тем, что локальные озера имеют сток с ограниченных водосборов, существенное влияние на который оказывают местные условия.

Использованная литература:

1. Абдиров Ч.А., Сагидуллаев Н.С., Константинова Л.Г. Микробиологическая и гидрохимическая характеристика важнейших водоемов Каракалпакии. Ташкент: Фан, 1970. 23 с.

2. Аденбаев Б.Е., Хикматов Ф.Х. Оценка современного состояния гидрологического режима водообеспеченности низовьев реки Амударья. Ташкент: Info Capital Books, 2021. 176 с.

3. Аденбаев Б.Е., Калабаев С.Б., Гидрография, морфометрия и мониторинг современного состояния озера Джылтырбас // Гидрометеорология и мониторинг окружающей среды. 2022. № 3. С. 52–61.

4. Баллиев А.И., Чембарисов Э.И. Оценка гидрологического и гидрохимического состояния водных объектов Южного Приаралья в условиях изменения климата // Изменение климата и его влияние на окружающую среду: проблемы и их решение. Материалы международной научно-практической конференции. Ташкент: НУУ, 2024. С. 160–162.

5. Горев Л.Н., Пелешенко В.И. Методика гидрохимических исследований. Киев: Вища школа, 1985. 212 с.

6. Ешимбаев Д. Гидрохимическое состояние водоемов Каракалпакии в условиях водохозяйственных мероприятий в бассейне Амударья. Ташкент: Фан, 1975, 87 с.

7. Калабаев С.Б., Жангабаев Д.М. Гидрография и морфометрия малых озёр Каракалпакстана, питающихся коллекторно-дренажными водами // Гидрологические и гидроэкологические проблемы Южного Приаралья: настоящее и будущее. Материалы республиканской научно-практической конференции. Нукус, 2023. С. 30–33. (На узб. яз.).

8. Курбанов А.Р., Ким С.И., Мустафаева З.А., Титова Н.О. Комплексное изучение современного экологического состояния естественных водоемов Республики Каракалпакстан // Научные труды Дальрыбвтуза, 2020. Т. 54, № 4. С. 28–42.

9. Мурадов О.Д., Валуконис Г.Ю., Мурадов Ш.О. Орошение и прогноз водно-солевого режима (на примере Каршинской степи). Ташкент: Узбекистан, 1982. 67 с.

10. Рубинова Ф.Э. Влияние водных мелиораций на сток и гидрохимический режим рек бассейна Аральского моря. Москва: Гидрометеоиздат, 1987. 131 с.

11. Рубинова Ф.Э. Изменение стока р. Амударьи под воздействием морских мелиораций в ее бассейне // Труды САНИИ Госкомгидромета. 1985. Вып. 106 (187). 116 с.

12. Рубинова Ф.Э. Изменение стока р. Сырдарьи под влиянием водохозяйственного строительства в ее бассейне. Москва: Гидрометеоиздат, 1979. 139 с.

13. Сергеев А.И. Математическое моделирование влияния орошаемого земледелия на гидрологический и гидрохимический режим рек: автореф. дисс. … докт. геогр. наук. Ташкент, 2001. 50 с.

14. Степанов И.Н., Чембарисов Э.И. Влияния орошения на минерализацию речных вод. Москва: Наука, 1978, 119 с.

15. Усманов А.У. К вопросу методологии оценки качества дренажных вод в целях использования их на орошение // Труды САНИИРИ. 1978. Вып. 156. С. 55–63.

16. Ходжибаев Н.Н., Сомойленко В.Г. Гидрогеолого-мелиоративные прогнозы и их обоснование. Ташкент: Фан, 1978. 144 с.

17. Ходжибаев Н.Н., Шерфединов Л.З. Вопросы гидрогеологического прогнозирования в аридных областях. Ташкент: Фан, 1982. 177 с.

18. Чембарисов Э.И, Бахритдинов Б.А Гидрохимия речных и дренажных вод средней Азии. Ташкент: Укитувчи, 1989. 231 с.

19. Чембарисов Э.И., Баллиев А.И. Гидрологическое и гидрохимическое состояние водных объектов Южного Приаралья // Экология и строительство. 2024. № 3. С. 4–11. DOI: 10.35688/2413-8452-2024-03-001.

20. Якубов М.А., Якубов Х.Э., Якубов Ш.Х. Коллекторно-дренажный сток Центральной Азии и оценка его использования на орошение. Ташкент: Узбекистан, 2011. 189 с.

21. Ablekim A., Ge Y., Wang Y., Hu R. (2019), The past, present and feature of the Aral Sea, *Arid Zone Res*., vol. 36, pp. 7–18. DOI: 10.13866/j.azr.2019.01.02.

22. He J., Yu Y., Sun L. (2024), Spatiotemporal variations of ecosystem services in the Aral Sea basin under different CMIP6 projections, *Sci Rep*., vol. 14, 12237. DOI:10.1038/s41598-024-62802-9.

23. Huang S. (2022), Impacts of climate change and evapotranspiration on shrinkage of Aral Sea, *Sci. Total Environ*, vol. 845, 157203. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157203.

24. Lioubimtseva E. (2023), The Aral Sea disaster: revisiting the past to plan a better future, *Book chapter: Biological and Environmental Hazards, Risks, and Disasters*, pp. 435–447. DOI: 10.1016/b978-0-12-820509-9.00008-3.

25. Yang G., Zhang M., Luo G., Liu T. (2024), Fluctuations of discharge and hydropower potential in the upper Amu Darya under the background of climate change, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 51, 101615. DOI: 10.1016/j.ejrh.2023.101615.

References:

1. Abdirov Ch.A., Sagidullayev N.S., Konstantinova. L.G. (1970), *Microbiological and hydrochemical characteristics of the most important water bodies of Karakalpakstan*. Tashkent, 23 p. (In Russ.).

2. Adenbaev B.E., Hikmatov F.Kh. (2021), *Assessment of the current state of the hydrological regime of water supply in the lower reaches of the Amu Darya River,* Tashkent, 176 p. (In Russ.).

3. Adenbaev B.E., Kalabaev S.B., (2022), Hydrography, Morphometry and Monitoring of the Current State of Lake Zhyltyrbas, *Hydrometeorology and Environmental Monitoring*, No. 3, pp. 52-61. (In Russ.).

4. Balliev A.I., Chembarisov E.I. (2024), Assessment of the hydrological and hydrochemical state of water bodies of the South Aral Sea region in the context of climate change, *Climate Change and its impact on the environment: problems and their solutions. Proceedings of the international scientific-practical conference*. Tashkent, pp. 160-162. (In Russ.).

5. Gorev L.N., Peleshenko V.I. (1985) *Methods of Hydrochemical Research,* Kyiv, 212 p. (In Russ.).

6. Eshimbaev D. (1975), *Hydrochemical state of water bodies of Karakalpakstan under water management measures in the Amu Darya basin,* Tashkent, 87 p. (In Russ.).

7. Kalabaev S.B., Zhangabaev D.M. (2023), Hydrography and Morphometry of Small Lakes Saturated by Collector-Dams in Karakalpakstan, *Hydrological and Hydroecological Problems of the Southern Aral Sea Region: Present and Future. Proceedings of the scientific-practical conference. Nukus*, pp. 30-33. (In Uzbek).

8. Kurbanov A.R., Kim S.I., Mustafayeva Z.A., Titova N.O. (2020), Comprehensive study of the current ecological state of natural water bodies of the Republic of Karakalpakstan, *Scientific works of Dalrybvtuz*, vol. 54, No. 4, pp. 28-42. (In Russ.).

9. Muradov O.D., Valukonis G.Yu., Muradov Sh.O. (1982), *Irrigation and forecasting of water-salt regime (on the example of the Karshi steppe),* Tashkent, 67 p. (In Russ.).

10. Rubinova F.E. (1987), *Influence of water melioration on the flow and hydrochemical regime of the rivers of the Aral Sea basin,* Moscow, 131 p. (In Russ.).

11. Rubinova F.E. (1985), Change in the flow of the Amu Darya River under the influence of marine melioration in its basin, *Works of the Sanitary and Epidemiological Institute of the State Hydrometeorological Committee*, issue 106 (187), 116 p. (In Russ.).

12. Rubinova F.E. (1979), *Change in the flow of the Syr Darya River under the influence of water management construction in its basin,* Moscow, 139 p. (In Russ.).

13. Sergeev A.I. (2001), *Mathematical modeling of the influence of irrigated agriculture on the hydrological and hydrochemical regime of rivers: abstract of the dissertation of Doctor of Geographical Sciences,* Tashkent, 50 p. (In Russ.).

14. Stepanov I.N., Chembarisov E.I. (1978), *Influence of irrigation on river water mineralization,* Moscow, 119 p. (In Russ.).

15. Usmanov A.U. (1978), On the issue of the methodology for assessing the quality of drainage waters in order to use them for irrigation, *Proceedings of SANIIRI*, Issue 156, pp. 55-63. (In Russ.).

16. Khojibayev N.N., Somoylenko V.G. (1978), *Hydrogeological and Meliorative Forecasts and Their Justification,* Tashkent, 144 p. (In Russ.).

17. Khojibayev N.N., Sherfedinov L.Z. (1982), *Issues of hydrogeological forecasting in arid regions,* Tashkent, 177 p. (In Russ.).

18. Chembarisov E.I, Bakhritdinov B.A. (1989), *Hydrochemistry of river and drainage waters of Central Asia*, Tashkent, 231 p. (In Russ.).

19. Chembarisov E.I., Balliev A.I. (2024), Hydrological and hydrochemical state of water bodies of the southern Aral Sea region, *Ecology and Construction*, No. 3, pp. 4-11. DOI: 10.35688/2413-8452-2024-03-001. (In Russ.).

20. Yakubov M.A., Yakubov Kh.E., Yakubov Sh.Kh. (2011), *Collector-drainage runoff of Central Asia and assessment of its use for irrigation,* Tashkent, 189 p. (In Russ.).

21. Ablekim A., Ge Y., Wang Y., Hu R. (2019), The past, present and feature of the Aral Sea, *Arid Zone Res*., vol. 36, pp. 7–18. DOI: 10.13866/j.azr.2019.01.02.

22. He J., Yu Y., Sun L. (2024), Spatiotemporal variations of ecosystem services in the Aral Sea basin under different CMIP6 projections, *Sci Rep*., vol. 14, 12237. DOI:10.1038/s41598-024-62802-9.

23. Huang S. (2022), Impacts of climate change and evapotranspiration on shrinkage of Aral Sea, *Sci. Total Environ*, vol. 845, 157203. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157203.

24. Lioubimtseva E. (2023), The Aral Sea disaster: revisiting the past to plan a better future, *Book chapter: Biological and Environmental Hazards, Risks, and Disasters*, pp. 435–447. DOI: 10.1016/b978-0-12-820509-9.00008-3.

25. Yang G., Zhang M., Luo G., Liu T. (2024), Fluctuations of discharge and hydropower potential in the upper Amu Darya under the background of climate change, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 51, 101615. DOI: 10.1016/j.ejrh.2023.101615.

Сведения об авторах:

Чембарисов Эльмир Исмаилович – Научно-исследовательский институт ирригации и водных проблем (Ташкент, Узбекистан), главный научный сотрудник, доктор географических наук, профессор. E-mail: chembar@mail.ru

Баллиев Ажинияз Ибрагимович – Международный центр стратегических разработки исследований в области продовольствия и сельского хозяйства (I-SCAD) при Министерстве сельского хозяйства Республики Узбекистан (Ташкент, Узбекистан), старший научный сотрудник доктор философии (PhD) по географическим наукам. E-mail: ajok90@mail.ru

Реймова Гулжамал Батырбаевна – Научно-исследовательский институт ирригации и водных проблем (Ташкент, Узбекистан), базовый докторант (PhD). E-mail: guljamalreymova25@gmail.com

Information about the authors:

Elmir Chembarisov – Research Institute of Irrigation and Water Problems (Tashkent, Uzbekistan), Chief Researcher, Doctor of Geographical Sciences, Professor. E-mail: chembar@mail.ru

Azhiniyaz Balliev – International Centre for Food and Agriculture Strategic Development and Research (I-SCAD) under the Ministry of Agriculture of the Republic of Uzbekistan, Senior Researcher, Doctor of Philosophy (PhD) in Geographical Sciences. E-mail: ajok90@mail.ru

Gulzhamal Reimova – Irrigation and Water Problems Research Institute (Tashkent, Uzbekistan), Basic Doctoral student (PhD). E-mail: guljamalreymova25@gmail.com

Для цитирования:

Чембарисов Э.И., Баллиев А.И., Реймова Г.Б. Прогнозирование содержания главных ионов в воде при известной величине минерализации // Центральноазиатский журнал географических исследований. 2025. № 3-4. С. 60-71.

For citation:

Chembarisov E.I., Balliev A.I., Reimova G.B. (2025), Predicting the content of major ions in water given a known mineralization value, *Central Asian Journal of Geographical Researches*, No. 3-4, pp. 60-71.