

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 628.112:631.67.03

doi: 10.31774/2712-9357-2025-15-3-223-241

Химический состав и оросительное качество подземных вод из индивидуальных водоисточников на территории Челябинской области

Денис Юрьевич Нохрин¹, Наталья Алексеевна Давыдова²

^{1,2}Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского
отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Российская Федерация

¹nokhrin8@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4920-2338>

²natascha.dawidowa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3922-6141>

Аннотация. Цель: оценка качества подземных вод, используемых для орошения индивидуальных участков жителей Челябинской области. **Материалы и методы.** 432 пробы, отобранные 2012–2024 гг. в колодцах и скважинах на территории частных земельных участков. Определен 31 показатель состава воды; рассчитаны: медиана, квартили, доля проб с превышением нормативов. Нормативы: 5 показателей отечественной почвенно-мелиоративной классификации и 9 международных (остаточный карбонат натрия, %Na, коэффициенты адсорбции Na и Mg, коэффициент Келли, индекс проницаемости, потенциальная соленость, синтетический коэффициент вредности K , коэффициент орошения Стеблера K_a). Данные визуализировали с использованием диаграммы Пайпера и круговых диаграмм. **Результаты и обсуждение.** На территории Челябинской области преобладают воды с гидрокарбонатным типом по анионному составу и кальциевым или смешанным с Ca и Mg типом по катионному составу. В 25 % проб зарегистрировано превышение норматива по нитратам. В целом воды имеют хороший индекс проницаемости (доля непригодных и вредных проб – ДНП – 2,5 %), низкую потенциальную соленость (3,5 %) и риск засоления по показателю минерализации (4,2 %), низкий риск хлоридного засоления (3,0 %), невысокое содержание натрия (ДНП по четырем разным показателям – 3,0–11,6 %) и магния (3,2–19,9 % по 2 показателям). По синтетическому коэффициенту вредности ДНП составила 37,3 %, а по коэффициенту орошения K_a – 1,2 %. ДНП с высоким содержанием микроэлементов составила: для Ba – 74,3 %, Cd – 36,1 %, F – 35,0 %, Fe – 25,8 %, Mn – 15,8 %, Pb – 6,5 %, Sr – 1,4 %, Ni – 0,63 %, Zn – 0,56 %, Cu – 0,00 %. **Вывод.** По большинству показателей подземная вода на индивидуальных участках в Челябинской области оказалась преимущественно пригодной для использования в целях орошения.

Ключевые слова: подземные воды, химический состав, диаграмма Пайпера, орошение, качество воды, доля непригодных проб

Финансирование: работа выполнена и финансировалась в рамках Государственного задания Минобрнауки по направлению № 532-2021-0001 «Создание и усовершенствование адаптивных технологий возделывания и переработки экономически значимых сельскохозяйственных культур на основе оптимизации биотических и абиотических факторов» по теме: «Оценка химического состава воды как важнейшего абиотического фактора повышения эффективности возделывания сельскохозяйственных культур».

Для цитирования: Нохрин Д. Ю., Давыдова Н. А., Химический состав и оросительное качество подземных вод из индивидуальных водоисточников на территории Челябинской области // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 3. С. 223–241. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-3-223-241>.



LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Chemical composition and irrigation quality of groundwater from individual water sources in the Chelyabinsk region

Denis Yu. Nokhrin¹, Natalia A. Davydova²

^{1, 2}Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

¹nokhrin8@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4920-2338>

²natascha.dawidowa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3922-6141>

Abstract. Purpose: to assess the groundwater quality used for irrigation of individual plots of residents of the Chelyabinsk region. **Materials and methods.** 432 samples were collected in 2012–2024 in wells and boreholes on the territory of private land plots. 31 indicators of water composition were determined; the median, quartiles, and proportion of samples exceeding standards were calculated. Standards are: 5 indicators of the domestic soil-reclamation classification and 9 international ones (residual sodium carbonate, %Na, Na and Mg adsorption coefficients, Kelly coefficient, permeability index, potential salinity, synthetic harmfulness coefficient K , Staebler irrigation coefficient K_a). The data were visualized using the Piper diagram and pie graphs. **Results and discussion.** The waters with a hydrocarbonate type by anion composition and a calcium or mixed with Ca and Mg type by cation composition predominate in the territory of the Chelyabinsk region. In 25 % of samples, the excess of the standard for nitrates was recorded. In general, the waters have a good permeability index (the share of unsuitable and harmful samples – UHS – 2.5 %), low potential salinity (3.5 %) and the salinization risk by the mineralization indicator (4.2 %), low risk chloride salinity (3.0 %), low sodium content (UHS for four different indicators – 3.0–11.6 %) and magnesium (3.2–19.9 % for 2 indicators). According to the synthetic harmfulness coefficient, the UHS was 37.3 %, and according to the irrigation coefficient K_a – 1.2 %. The UHS with a high content of microelements was: for Ba – 74.3 %, Cd – 36.1 %, F – 35.0 %, Fe – 25.8 %, Mn – 15.8 %, Pb – 6.5 %, Sr – 1.4 %, Ni – 0.63 %, Zn – 0.56 %, Cu – 0.00 %. **Conclusion.** According to most indicators, groundwater in individual plots in the Chelyabinsk region turned out to be predominantly suitable for use for irrigation purposes.

Keywords: groundwater, chemical composition, Piper diagram, irrigation, water quality, proportion of unsuitable samples

Funding: the work was carried out and funded within the framework of the State Assignment of the Ministry of Education and Science in the direction No. 532-2021-0001 “Creation and improvement of adaptive technologies for the cultivation and processing the economically significant agricultural crops based on the optimization of biotic and abiotic factors” on the theme: “Assessment of the chemical composition of water as the most important abiotic factor in increasing the efficiency of agricultural crop cultivation”.

For citation: Nokhrin D. Yu., Davydova N. A. Chemical composition and irrigation quality of groundwater from individual water sources in the Chelyabinsk region. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2025;15(3):223–241. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-3-223-241>.

Введение. В последнее время наличие индивидуальной скважины на частном земельном участке стало в России нормой, что во многом связано с доступностью для населения услуг по ее обустройству, а также в по-

давляющем большинстве случаев отсутствием юридических сложностей. Рациональное желание владельцев участков иметь собственный независимый источник водоснабжения для хозяйственных и питьевых нужд нередко сочетается с верой в чистоту и целебные свойства подземных вод, что зачастую неверно. Учитывая высокую концентрацию участков в окрестностях городов (садовые товарищества, коттеджные поселки), в грунтовые воды идет интенсивный поток органического вещества и продуктов его минерализации из ямных туалетов, негерметичных выгребных ям, бань, мест складирования органических удобрений. На территории всего Урала, в том числе Челябинской области, ситуация осложняется крайне неоднородным геохимическим фоном и многочисленными зонами эксхалации радона из гранитных массивов. Эти факторы в сочетании с небольшой глубиной индивидуальных скважин обуславливают зачастую низкое потребительское качество подземных вод, включая повышенные минерализацию и/или жесткость, концентрацию железа, марганца, α - и β -активность [1], а также токсичность в биотестах [2]. Однако если низкое техническое или санитарное качество воды относительно легко решается установкой систем водоподготовки или использованием в питьевых целях бутилированной воды, то качество подземных вод для орошения растений на индивидуальных участках представляет собой отдельную проблему. Оно нуждается в специальной оценке для определения принципиальной возможности использования таких вод и наличия ограничений, а также для выбора технологий полива с целью сохранения плодородия почв и получения хороших урожаев. На актуальность темы указывает также продолжающийся тренд на потепление климата в Челябинской области. Так, согласно прогнозу, к 2050 г. среднегодовая температура в разных районах области увеличится с 3,98 °C на 1,02–1,23 °C [3], что неизбежно приведет к необходимости увеличения частоты поливов. Цель нашего исследования заключалась в оценке оросительных свойств подземных вод из индивидуальных ис-

точников на территории Челябинской области по ряду отечественных и зарубежных показателей качества.

Материалы и методы. Работа выполнена в ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН в рамках государственного задания Минобрнауки по направлению № 532-2021-0001 «Создание и усовершенствование адаптивных технологий возделывания и переработки экономически значимых сельскохозяйственных культур на основе оптимизации биотических и абиотических факторов» по теме: «Оценка химического состава воды как важнейшего абиотического фактора повышения эффективности возделывания сельскохозяйственных культур». Материалом послужили данные за 2012–2024 гг. из собственной многолетней ежегодно пополняемой базы данных о химическом составе подземных вод на территории Челябинской области. Отбор проб проводился преимущественно сотрудниками ООО «Экспертный центр санитарно-экологического соответствия» или заказчиками анализа на территории индивидуальных земельных участков в населенных пунктах, коттеджных поселках и садовых некоммерческих товариществах. Около половины всех проб были отобраны в черте г. Челябинска и на территории окружающего его с трех сторон Сосновского района Челябинской области. Водоемосточниками служили колодцы глубиной 4–10 м (20 проб) и скважины глубиной 12–200 м (412 проб), между которыми мы не делали различий, поскольку все они являлись источниками воды для полива растений на участках.

Всего было изучено 432 пробы. Концентрацию главных ионов, соединений азота и фосфора, а также ионов Br^{2+} и Sr^{2+} определяли методом капиллярного электрофореза («Капель 103-Р», ГК «Люмэкс», Россия) с пакетом «МультиХром для Windows» (v. 1.52u, ЗАО «Амперсенд»). Общую щелочность, содержание гидрокарбонат- и карбонат-ионов рассчитывали по точке перегиба кривой титрования 30 мл пробы 0,02 н раствором HCl в программе Alkalinity Calculator (v. 2.22, <http://or.water.usgs.gov/alk/index.html>)

либо определяли по ГОСТ 31957-2012. Фотометрические измерения (окисляемость, кремний) выполнены на фотоколориметре КФК 2 (АО «Загорский оптико-механический завод», Россия), потенциометрические – на иономере И-160МИ (ЗАО «Измерительная техника», Россия), кондуктометрические – на кондуктометрах EZ-1 (Meterics®, Китай) или «Анион-7000» (НПП «Инфраспек-Аналит», Россия). Анализ на содержание в воде металлов проводился согласно ГОСТ Р 51309-99 и ПНД Ф 14.1:2.253-09 на атомно-абсорбционных спектрофотометрах «AAS-1» («Carl Zeiss», Германия) и МГА 915 (ГК «Люмэкс», Россия).

По показателям ионного состава воды рассчитывали 14 показателей оросительного качества, используемых в отечественной [4] и зарубежной [5, 6] практике, а также находили для них доли (в %) вод разного качества. Для нитритов, нитратов и 11 микроэлементов вычисляли долю проб (в %) с превышением норматива по почвенно-мелиоративной классификации качества [4]. В ходе статистического анализа полученных данных рассчитывали медиану с квартилями, строили гистограмму распределения (минерализация) и диаграмму Пайпера для визуализации соотношения эквивалентных концентраций главных ионов в пробах. Расчеты и графические построения выполнены в пакете PAST (v. 5.1 [7]) и статистической среде R (<https://www.r-project.org>) с пакетом ggplot2 [8] и кодом [9].

Результаты и обсуждение. Обобщенные данные по химическому составу вод представлены в таблице 1.

Выбор порядковых статистик для описания данных – медианы как меры положения и межквартильного размаха (*IQR*) как меры рассеяния – был продиктован сильной асимметрией распределения подавляющего большинства показателей. Последняя отчасти видна из представленных статистик. Так, например, максимальное значение общей жесткости составляло 159,2 °Ж, тогда как половина всех проб находилась в границах 4,16–9,78 при медиане в 6,46 °Ж.

Таблица 1 – Химический состав подземных вод из индивидуальных водоисточников в Челябинской области
Table 1 – Chemical composition of groundwater from individual water sources in the Chelyabinsk region

Показатель, единица измерения	Количество проб	Минимум / максимум	Медиана	Квартиль Q_1 / Q_3
Глубина скважины, м	281	4 / 200	31	24 / 50
Общие				
Водородный показатель, pH	432	3,93 / 8,61	7,24	6,97 / 7,52
Жесткость общая, °Ж	432	0,08 / 159,2	6,46	4,16 / 9,78
Минерализация				
- сухой остаток, мг/дм ³	349	3 / 15909	471	303 / 769
- сумма ионов, мг/дм ³	432	54 / 12994	665	456 / 941
Щелочность общая, ммоль/дм ³	432	0,0 / 620	5,50	3,97 / 7,15
Удельная электрическая проводимость, мкСм/см	413	52 / 13720	757	520 / 1082
Главные ионы и карбонатная система				
Гидрокарбонаты (HCO_3^-), мг/дм ³	432	0,0 / 2961	334,2	236,5 / 417,1
Калий (K^+), мг/дм ³	432	< 0,5 / 398	2,4	1,0 / 4,4
Кальций (Ca^{2+}), мг/дм ³	432	1,1 / 1283	73,2	46,7 / 113,2
Карбонаты (CO_3^{2-}), мг/дм ³	432	0,0 / 14,0	0,38	0,0 / 0,73
Магний (Mg^{2+}), мг/дм ³	432	< 0,25 / 1153	30,2	18,8 / 51,6
Натрий (Na^+), мг/дм ³	432	1,5 / 2261	50,8	21,7 / 91,5
Сульфаты (SO_4^{2-}), мг/дм ³	432	0,5 / 3400	62,6	27,7 / 122,9
Хлориды (Cl^-), мг/дм ³	432	< 0,5 / 5014	26,1	6,4 / 66,9
Биогенное и органическое вещество				
Аммония ион (NH_4^+), мг/дм ³	432	< 0,5 / 10,6	0,13	< 0,50 / 0,41
Нитриты (NO_2^-), мг/дм ³	400	< 0,5 / 293,5	< 0,50	< 0,50 / 0,41
Нитраты (NO_3^-), мг/дм ³	432	< 0,5 / 637,6	12,8	1,70 / 44,9
Фосфаты (HPO_4^{2-}), мг/дм ³	235	< 0,25 / 38,0	0,46	< 0,25 / 1,27
Окисляемость перманганатная, мгО/дм ³	423	< 0,25 / 24,8	1,30	0,54 / 2,45
Микроэлементы и тяжелые металлы				
Барий (Ba^{2+}), мг/дм ³	358	< 0,05 / 20,8	0,33	0,09 / 0,95
Железо (Fe), мг/дм ³	427	< 0,010 / 146,8	0,085	0,031 / 0,315
Кадмий (Cd), мг/дм ³	147	< 0,005 / 0,048	< 0,005	< 0,005 / < 0,005
Кобальт (Co), мг/дм ³	150	< 0,015 / 0,192	< 0,015	< 0,015 / 0,009
Кремний (Si), мг/дм ³	403	< 0,5 / 29,8	9,4	7,3 / 14,9
Марганец (Mn), мг/дм ³	323	< 0,010 / 9,10	0,021	0,006 / 0,086
Медь (Cu), мг/дм ³	186	< 0,001 / 0,247	0,005	0,002 / 0,010
Никель (Ni), мг/дм ³	160	< 0,015 / 0,315	< 0,015	< 0,015 / 0,010
Свинец (Pb), мг/дм ³	123	< 0,020 / 0,096	< 0,020	< 0,020 / < 0,020
Стронций (Sr^{2+}), мг/дм ³	428	< 0,5 / 31,8	0,65	0,30 / 1,17
Цинк (Zn), мг/дм ³	178	< 0,004 / 1,16	0,026	0,012 / 0,054
Фтор (F^-), мг/дм ³	326	< 0,10 / 20,5	0,65	0,22 / 2,84

Другой особенностью полученных данных было большое количество цензурированных наблюдений типа «менее чем», когда определенные аналитические значения находились ниже предела чувствительности методик. В случае использования средних значений и соответствующих мер размаха или интервалов надежности эти значения требовали бы специальных методов расчета [10, 11], однако для медиан и квартилей такой проблемы не существует. Дадим краткую характеристику подземных вод изученных территорий на основе данных таблицы 1.

По реакции среды воды варьировали от кислых до щелочных, но медиана и *IQR* соответствовали нейтральным водам. По величине жесткости они изменялись от мягких до очень жестких, тогда как медианное значение относилось к средней жесткости, а *IQR* включал средние и жесткие воды. Судя по низким концентрациям Ba^{2+} и Sr^{2+} , жесткость была обусловлена преимущественно ионами Ca^{2+} и Mg^{2+} , причем в основном была временной, или устранимой. Это хорошо видно из диаграммы Пайпера (рисунок 1), где воды кальциевые, магниевые и смешанного типа, имея главным анионом гидрокарбонат-ион, проецировались в левую зону классифицирующего ромбического поля, т. е. в зону вод временной жесткости (IV гидрохимическая фация и 5-й тип воды по классификации У. Бэка [12]). И, напротив, соленых вод с преобладанием анионов Cl^- и SO_4^{2-} и катионов K^+ и Na^+ (правая часть классифицирующего поля) было меньше всего – 10 шт., или 2,3 %. Общая минерализация изменялась в очень широких пределах: от «весьма мягких пресных вод» до «сильносоленых соленых вод» по классификации И. К. Зайцева (1961) с *IQR* в границах от «мягких пресных» до «жестких пресных вод».

Содержание органического вещества было низким, а продуктов его разложения заметным. В особенности это касается нитратов – последнего звена минерализации органического азота. В 108 пробах (25,0 %) их концентрация превышала санитарный (по СанПиН 1.2.3685-21) и оросительный [4]

норматив в 45 мг/дм^3 , причем кратность превышения достигала двух (11,3 %), трех (10,6 %), четырех (5,1 %), пяти (2,3 %) и более (до 14) раз.

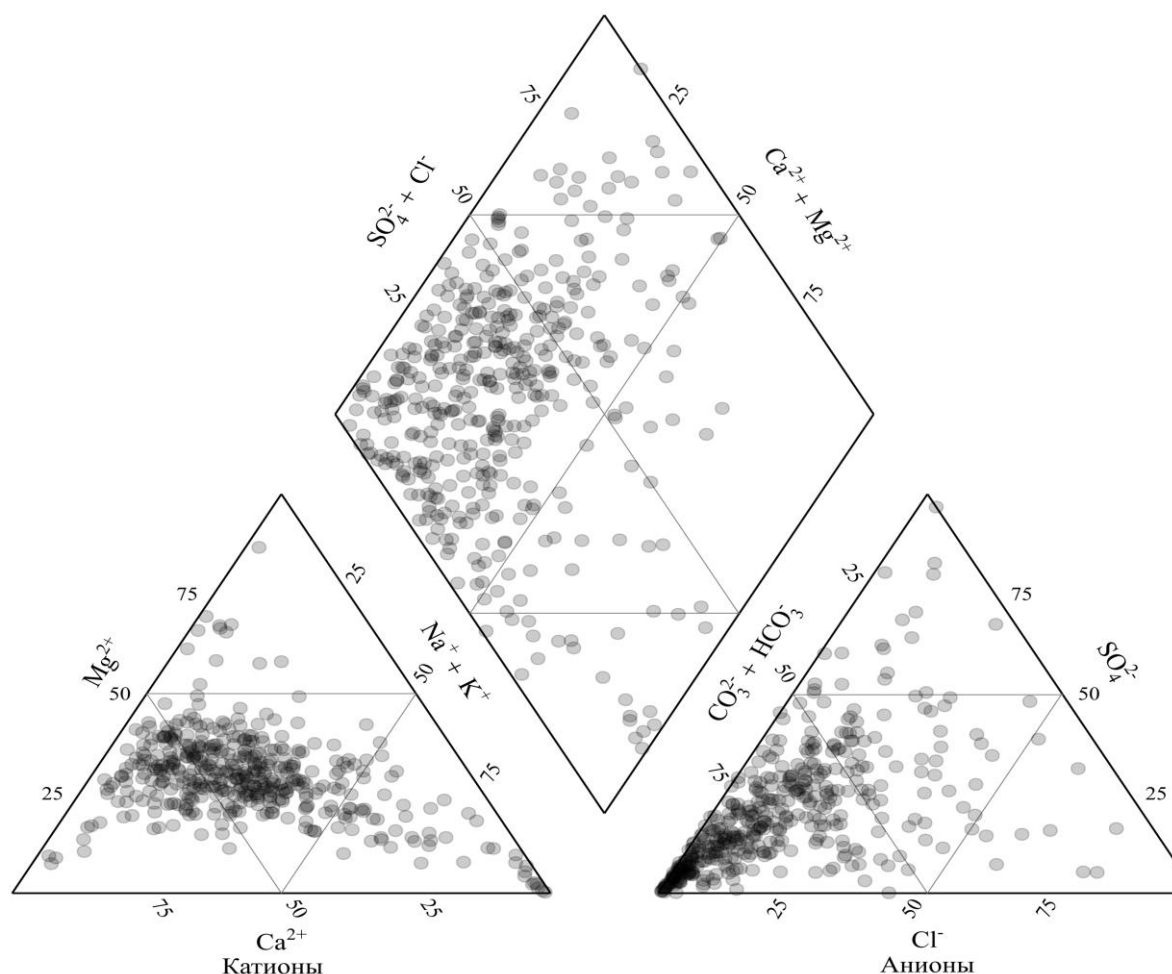


Рисунок 1 – Ионный состав подземных вод из индивидуальных водоисточников на территории Челябинской области на диаграмме Пайпера ($n = 432$)

Figure 1 – Ionic composition of groundwater from individual water sources in the Chelyabinsk region on the Piper diagram ($n = 432$)

Приравнивание нормативов ирригационной и санитарной опасности иона NO_3^- представляется нам спорным, но в любом случае наблюдаемая ситуация указывает на мощный приток органического вещества в водоносные горизонты на изученных территориях. Доля проб с превышением норматива по нитритам (3 мг/дм^3 по СанПиН 1.2.3685-21) составила 2,5 %. Соотношение значений перманганатной окисляемости и разных форм минерального азота позволяет заключить, что, благодаря деятельности мик-

роорганизмов, подавляющая часть поступающего органического вещества успевает минерализоваться до водозабора.

Если судить по медианным значениям, микроэлементный состав изученных подземных вод не был примечательным. Однако максимальные концентрации указывают на неоднородность вод в этом отношении и согласуются с фактом высокой геохимической неоднородности Урала с большим числом микроэлементных биогеохимических провинций [13]. Сравнение наблюдаемых концентраций с нормативами будет представлено ниже.

Описательная статистика для 13 показателей качества вод, используемых в целях орошения, представлена в таблице 2. Рассмотрим их подробнее с указанием доли проб, пригодных для орошения.

Таблица 2 – Оросительное качество подземных вод из индивидуальных водоисточников в Челябинской области ($n = 432$)

Table 2 – Irrigation quality of groundwater from individual water sources in the Chelyabinsk region ($n = 432$)

Показатель, единица измерения	Минимум / Максимум	Медиана	Квартиль Q_1 / Q_3
Почвенно-мелиоративная классификация качества [5]			
Минерализация, г/л	0,054 / 12,99	0,665	0,456 / 0,941
Хлоридное засоление, мг-экв/л	0,003 / 141,4	0,737	0,182 / 1,886
Натриевое осолонцевание, усл. ед.	0,009 / 47,97	1,745	0,997 / 3,760
Магниевое осолонцевание, доли ед.	0,077 / 0,889	0,411	0,349 / 0,479
Содообразование = Остаточный карбонат натрия (RSC), мг-экв/л	– 150,3 / 11,49	– 1,017	– 3,36 / 0,444
Международные показатели качества оросительных вод			
Процентное содержание натрия (%Na), %	1,37 / 98,87	25,62	15,18 / 36,4
Коэффициент адсорбции натрия (SAR), мг-экв/л	0,043 / 38,66	1,21	0,58 / 2,08
Коэффициент Келли (KR), %	0,013 / 87,87	0,327	0,163 / 0,561
Коэффициент адсорбции магния (MAR), %	7,68 / 88,89	41,11	34,9 / 47,9
Индекс проницаемости (PI), %	9,11 / 220,2	51,20	39,4 / 63,9
Потенциальная соленость (PS), мг-экв/л	0,035 / 176,8	1,49	0,544 / 3,23
Синтетический коэффициент вредности (K), усл. ед.	1,12 / 175,0	9,73	6,74 / 13,7
Коэффициент орошения (K_d), мг-экв/л	0,407 / 1188	29,7	13,9 / 78,3

Минерализация. Как видно из таблицы 2, верхний квартиль находился почти на границе пресных и солоноватых вод, а это значит, что пример-

но в 75 % всех изученных проб вода была пресной. Рисунок 2 показывает, что распределение проб по минерализации приближалось к логарифмически нормальному. При этом лишь малая часть (4,2 % имела) опасный класс качества.

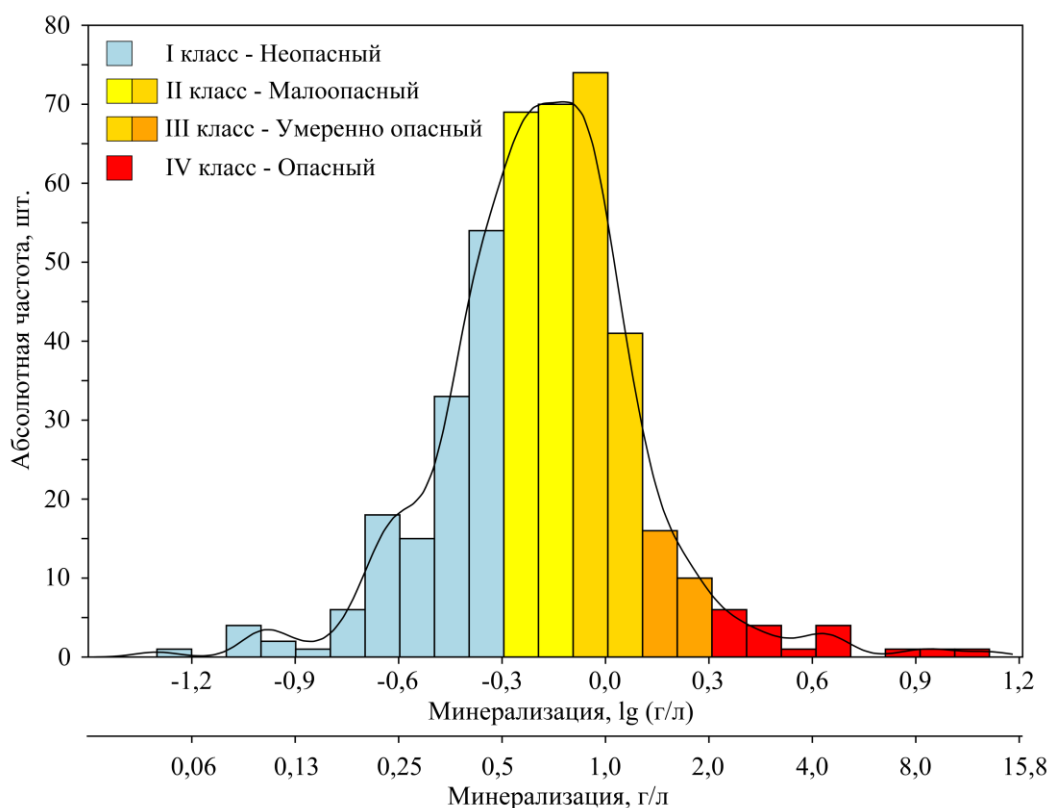


Рисунок 2 – Гистограмма распределения подземных вод Челябинской области ($n = 432$) по минерализации и оросительному качеству
Figure 2 – Histogram of groundwater's distribution in the Chelyabinsk region ($n = 432$) by mineralization and irrigation quality

Натрий и связанные с ним показатели. Поскольку Na является наиболее проблемным элементом, влияющим на структуру почвы и усвоение влаги растениями, он входит сразу в несколько показателей качества. По процентному содержанию Na и риску натриевого осолонения почвы 35,6 и 44,9 % проб воды имели безопасное его содержание (рисунок 3). Напротив, доли непригодных вод и вод сомнительного качества по %Na (в сумме 7,4 %) были малы и близки к доле проб с высоким риском натриевого осолонения (10,2 %).

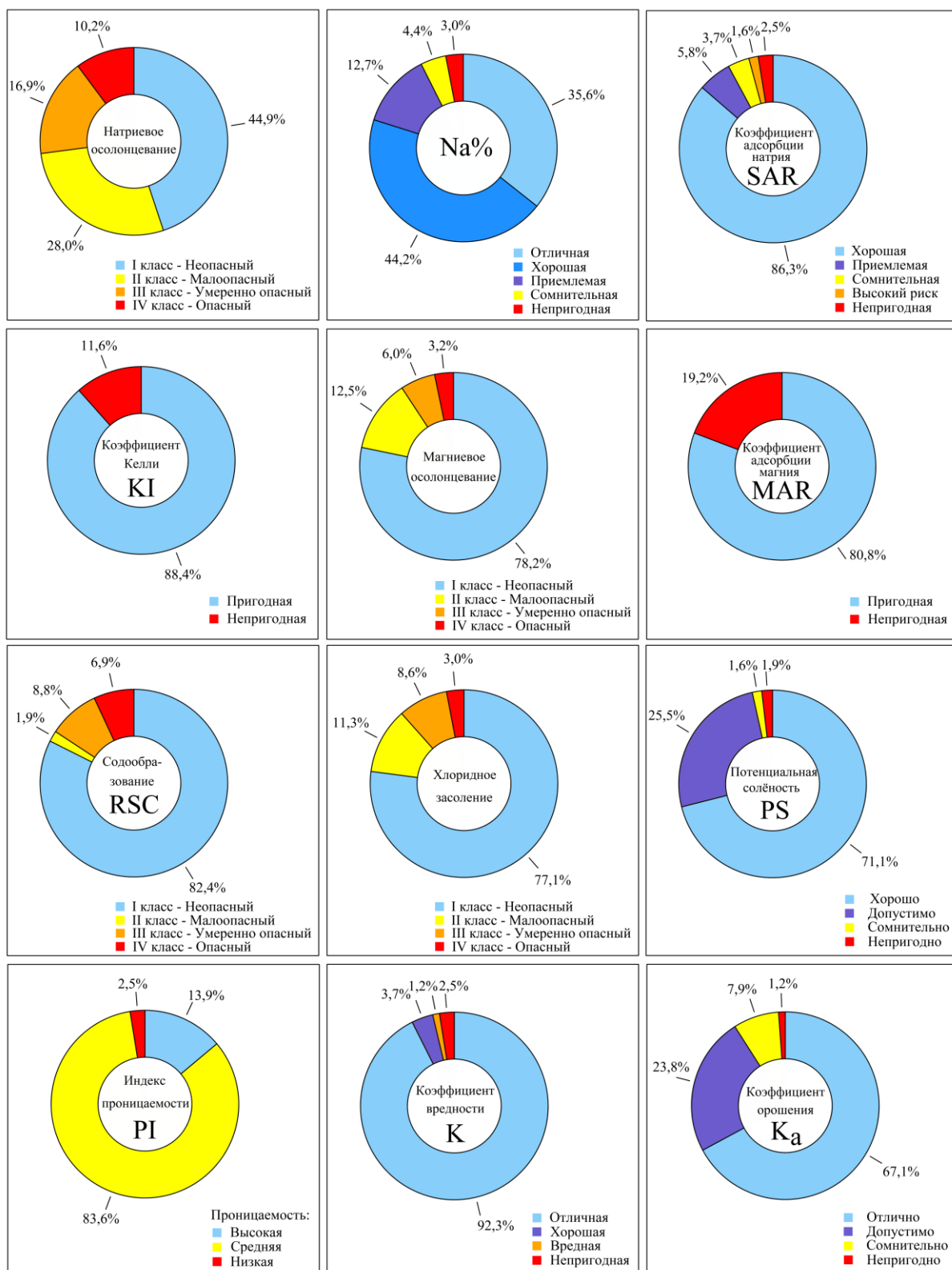


Рисунок 3 – Оросительное качество вод Челябинской области по отечественным и международным показателям ($n = 432$)

Figure 3 – Water irrigation quality in the Chelyabinsk region according to Russian and international indicators ($n = 432$)

Сходные доли пригодной и непригодной для орошения воды показали индекс Келли (до 1 % включительно и свыше 1 %) и коэффициент адсорбции натрия (менее 10 ед. и более 26 ед.). В целом воды Челябинской области демонстрировали невысокую долю непригодных проб по четырем разным связанным с содержанием натрия показателям качества: от 2,5 до 11,6 %.

Магний в качестве основного элемента входит в расчет магниевое осолонцевания и коэффициента адсорбции магния. По сути это один и тот же показатель, но только в первом случае доля Mg^{2+} в суммарном содержании ($Mg^{2+} + Ca^{2+}$) выражается в долях единицы, а во втором – в процентах. Отечественная классификация обладает большей дискретностью и выделяет 4 класса качества, тогда как западная – только 2: ≤ 50 % (пригодная) и > 50 % (непригодная). Как видно из таблицы 2, верхняя квартиль находилась ниже 0,5, или 50 %, что указывает на долю пригодных проб не менее 75 %, а согласно рисунку 3, она составляет 78,2 и 80,8 %.

Содообразование. Данный показатель как в отечественной, так и в зарубежной классификации рассчитывается идентично: как разность между содержанием суммы анионов ($HCO_3^- + CO_3^{2-}$) и суммы катионов ($Mg^{2+} + Ca^{2+}$), показывая количество (в мг-экв/л) карбонат- и гидрокарбонат-ионов, способных взаимодействовать со щелочными металлами. Классификации вод по этому показателю также близки: по первой он не должен превышать 1 (таких проб было – 82,4 %), а по второй – 1,25 (84,3 %). Таким образом, большинство изученных проб были безопасными для орошения, а доля опасных проб составила 6,9–15,7 %.

Индекс проницаемости (Permeability index, PI) используется для оценки вероятного влияния качества воды на физические свойства почв, преимущественно за счет вклада катиона натрия. Рассчитывается в мг-экв/л по формуле:

$$PI = \frac{Na^+ + \sqrt{HCO_3^-}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} \times 100 \% . \quad (1)$$

По PI вода делится на 3 класса: I – высокая ожидаемая проницаемость (75 % и выше), II – средняя (25–75 %) и III – низкая (25 % и менее). Вода класса III не подходит для орошения. Как видно из данных таблицы 2 и рисунка 3, в изученных пробах преобладали таковые со средним индексом проницаемости (83,6 %).

Потенциальная соленость (Potential salinity, PS). Показатель основан на концентрации в воде хлорид- и сульфат-ионов. Рассчитывается в мг-экв/л по формуле:

$$PS = Cl^- + \frac{1}{2} SO_4^{2-} . \quad (2)$$

Считается, что для орошения всех типов почв подходят воды с PS менее 3. В случае $PS = 3–15$ мг-экв/л воду допустимо использовать для орошения почв среднего и крупного гранулометрического состава, а 15–20 мг-экв/л – только на крупнозернистых почвах. Вода изученных образцов была преимущественно безопасна по этому показателю, а доли сомнительных и непригодных проб составили только 1,6 и 1,9 %.

Синтетический коэффициент вредности (Synthetic Harmful Coefficient K) отражает опасность одновременно и солей, и щелочей в составе воды. Рассчитывается (в усл. ед.) по формуле:

$$K = 12,4M + SAR, \quad (3)$$

где M – минерализация, в г/л;

SAR – коэффициент адсорбции натрия.

По значениям K воды для орошения классифицируют следующим образом: отличные ($K < 25$), хорошие ($25 < K < 36$), вредные ($36 < K < 44$) и непригодные ($K > 44$). По данному коэффициенту воды изученных образцов были безопасными. По данному показателю 92,3 % проб были отнесены к водам отличного качества (рисунок 3).

Коэффициент орошения Стеблера (Irrigation Coefficient K_a). Был введен эмпирически около 100 лет назад в ходе исследований по влиянию защелачивания и засоления почвы на 40 распространенных сельскохозяйственных культурах. Он рассчитывается по системе формул (4) в зависимости от типа воды и имеет физическую интерпретацию: K_a – это столб воды в дюймах, который при испарении делает почву непригодной на глубину до 1,2 м [14].

$$K_a = \begin{cases} \frac{288}{5\text{Cl}^-}, & \text{если } \text{Na}^+ < \text{Cl}^- \\ \frac{288}{\text{Na}^+ + 4\text{Cl}^-}, & \text{если } \text{Cl}^- < \text{Na}^+ < \text{Cl}^- + 2\text{SO}_4^{2-} \\ \frac{288}{10\text{Na}^+ - 5\text{Cl}^- - 9\text{SO}_4^{2-}}, & \text{если } \text{Na}^+ > \text{Cl}^- + 2\text{SO}_4^{2-} \end{cases} . \quad (4)$$

Несмотря на внушительный возраст, данный коэффициент остается востребованным в современных исследованиях с широкой географией [15–18]. Классификация вод по K_a такова: > 18 – отлично, $6–18$ – допустимо, $1,2–6$ – сомнительно, $< 1,2$ – вода непригодна для орошения. По данному коэффициенту пробы подземных вод Челябинской области были преимущественно безопасными (рисунок 3).

Микроэлементы. На постоянной основе нами изучались только железо, барий, стронций и кремний (таблица 1). Пик фторид-иона на электрофореграммах капиллярного электрофореза зачастую сливался с пиком формиат-иона и ввиду трудоемкости вычленения методом добавок анализировался не всегда. Исходя из значений почвенно-мелиоративной классификации [4], изученные микроэлементы расположились в следующий убывающий по опасности ряд: Ва (74,3 % проб с превышением норматива), Cd (36,1 %), F (35,0 %), Fe (25,8 %), Mn (15,8 %), Pb (6,5 %), Sr (1,4 %), Ni (0,63 %), Zn (0,56 %), Cu (0,00 %). Особое положение бария можно объяснить строгостью границы опасности (0,1 мг/дм³), но вероятнее всего, концентрация этого элемента в водах Уральского региона действительно

повышена. Так превышающие санитарные нормативы концентрации бария отмечались в подземных водах Свердловской области (наряду с железом, марганцем и радионуклидами) [19] и Курганской области (наряду с марганцем, литием и бором) [20]. Полученный ряд микроэлементной опасности оросительных вод хорошо согласуется с результатами изучения подземных вод только Сосновского района Челябинской области [11].

Таким образом, по большинству показателей качества вода из индивидуальных скважин на территории Челябинской области оказалась преимущественно пригодной для использования в целях орошения.

Выводы.

1 По всем показателям химического состава подземные воды Челябинской области варьировали в широких пределах. По соотношению концентраций главных ионов преобладали воды с временной жесткостью (гидрокарбонатный тип по анионному составу и кальциевый или смешанный с преобладанием кальция и магния тип по катионному составу).

2 В 25 % проб зарегистрировано превышение норматива по нитратам при обычно низком содержании органического вещества.

3 Подземные воды Челябинской области имеют хороший индекс проницаемости (доля непригодных и вредных проб – ДНП – 2,5 %), низкую потенциальную соленость (ДНП – 3,5 %) и риск засоления по показателю минерализации (4,2 %), низкий риск хлоридного засоления почвы (3,0 %), невысокое содержание натрия и риск натриевого осолонцевания (ДНП по четырем разным показателям – от 3,0 до 11,6 %), а также невысокое содержание магния и риск магниевое осолонцевания (ДНП по двум показателям: 3,2 и 19,9 %). По синтетическому коэффициенту вредности K ДНП была 37,3 %, а по коэффициенту орошения K_a – только 1,2 %.

4 Доля непригодных проб с высоким содержанием микроэлементов составила: для Ba – 74,3 %, Cd – 36,1 %, F – 35,0 %, Fe – 25,8 %, Mn – 15,8 %, Pb – 6,5 %, Sr – 1,4 %, Ni – 0,63 %, Zn – 0,56 %, Cu – 0,00%.

Список источников

1. Кнутарева Н. Г. Использование подземных вод для питьевого водоснабжения в населенных пунктах // Водные ресурсы Южного Урала. Проблемы водохозяйственного комплекса: сб. науч. ст. науч.-практ. конф., г. Челябинск, 27–28 апр. 2004 г. Челябинск: Челябинский Дом ученых, 2004. С. 164–167.
2. Нестеркина К. С., Нохрин Д. Ю. Химический состав и качество воды ряда скважин Челябинской области по результатам биотестирования // Вестник Совета молодых ученых и специалистов Челябинской области. 2024. № 1(44), Т. 1. С. 4–9. EDN: FLOPFQ.
3. Анализ агроклиматических условий Уральского региона за период с 1966 по 2020 гг. и перспективный прогноз изменения среднегодовой температуры до 2050 года / А. А. Васильев, Д. Ю. Нохрин, Ф. М. Гасымов, Н. В. Глаз // АПК России. 2022. Т. 29, № 2. С. 139–147. DOI: 10.55934/2587-8824-2022-29-2-139-147. EDN: ZNTCDL.
4. Повышение плодородия орошаемых земель: науч.-практ. изд. / А. Н. Бабичев, Р. С. Масный, Г. Т. Балакай, Л. М. Докучаева, И. В. Гурина, Р. Е. Юркова, В. А. Монастырский, В. И. Ольгаренко, С. А. Селицкий, А. А. Бабенко. М.: Росинформагротех, 2023. 304 с. ISBN: 978-5-7367-1740-8.
5. Kiy M. S. Arslan H. Assessment of groundwater quality for irrigation and drinking using different quality indices and geostatistical methods in Çorum province (Turkey) // Irrigation and Drainage. 2021. Vol. 70, no. 4. P. 871–886. DOI: 10.1002/ird.2593. EDN: QJNSOH.
6. Fallatah O., Khattab M. R. Evaluation of groundwater quality and suitability for irrigation purposes and human consumption in Saudi Arabia // Water. 2023. Vol. 15, no. 13. Article number: 2352. DOI: 10.3390/w15132352. EDN: HWDHDF.
7. Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. Past: Paleontological statistics software package for education and data analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. Vol. 4, iss. 1. P. 1–9.
8. ggplot2: Create elegant data visualizations using the grammar of graphics [Electronic resource] / H. Wickham, W. Chang, L. Henry [et. al.]. Apr. 23, 2024. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/index.html>. DOI: 10.32614/CRAN.package.ggplot2 (date of access: 04.04.2025).
9. Dorian J., Lipka M. ggplot Piper Diagram [Electronic resource]. Jan. 24. 2018. URL: https://git-hub.com/markolipka/ggplot_Piper (date of access: 04.04.2025).
10. Нохрин Д. Ю. Проблема анализа данных с цензурированными наблюдениями типа «менее чем» в биологии и программное обеспечение для ее решения // Образование магистров: проблемы и перспективы развития: тез. докл. VII Всерос. конф., г. Челябинск, 18–19 дек. 2023 г. Челябинск: Челябинский гос. ун-т, 2024. С. 89–95. EDN: DAYAKS.
11. Нохрин Д. Ю., Давыдова Н. А. Гидрохимическая характеристика и качество подземных вод Сосновского района Челябинской области для целей орошения // Аграрный вестник Урала. 2020. Специальный выпуск «Биология и биотехнологии». S14. С. 56–69. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-14-56-69. EDN: EYDZFP.
12. Back W. Techniques for mapping of hydrochemical facies // U. S. Geol. Surv. Prof. Paper. 1961. Paper: 424-D. P. 380–382.
13. Грибовский Г. П., Грибовский Ю. Г., Плохих Н. А. Биогеохимические провинции Урала и проблемы техногенеза // Труды биогеохимической лаборатории. Т. 24. Техногенез и биогеохимическая эволюция таксонов биосферы. М.: Наука, 2003. С. 174–187.
14. Приклонский В. А. Изучение физических свойств и химического состава подземных вод. М.; Л.: Гл. ред. геологоразвед. и геодез. лит., 1935. 60 с.
15. Sustainable agriculture and sustainability of water resources from the aspect of environmental protection / T. Grujic, R. Pivic, J. Maksimovic, A. S. Sebic, Z. Dinic, D. Jaramaz, S. T. Jojevic // Ecocycles. 2021. Vol. 7, no. 1. P. 88–94. DOI: 10.19040/ecocycles.v7i1.202. EDN: YTAENS.

16. Hydrogeochemistry of shallow groundwater and suitability to irrigation: the case of the Karfiguéla Paddy field in Burkina Faso / S. É. Serge Gaëtan, C. H. Marie Michelle, K. Ouindinboudé Jacques, Y. Poulouma Louis, S. Idriss // *Water*. 2022. Vol. 14, no. 16. Article number: 2574. DOI: 10.3390/w14162574. EDN: SHFYBK.

17. Дрововозова Т. И., Красовская Н. Н. Динамика ирригационного качества оросительной и дренажно-сбросных вод Нижне-Донской оросительной системы в 1972 и 2019–2021 годах // *Мелиорация и гидротехника*. 2023. Т. 13, № 1. С. 87–100. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-1-87-100. EDN: NXUHIW.

18. Melentiev E., Rotaru M. Anthropogenic influence on the water resource quality in the village of Bălănești, Nisporeni district // *Acta et Commentationes, Exact and Natural Sciences*. 2023. Vol. 15, no. 1. P. 78–87. DOI: 10.36120/2587-3644.v15i1.78-87. EDN: WZSOYW.

19. Семенищев В. С., Титова С. М., Воронина А. В. Определение качества воды в родниках Екатеринбурга и Свердловской области // *Водное хозяйство России*. 2020. № 5. С. 126–138. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-5-8. EDN: ZRKGHN.

20. Максимович Н. Г., Казакевич С. В., Блинов С. М. Гидрогеологические условия западной части Курганской области // *Вестник Пермского университета*. 2001. Вып. 3 (Геология). С. 159–178.

References

1. Knutareva N.G., 2004. *Ispol'zovanie podzemnykh vod dlya pit'evogo vodosnabzheniya v naselennykh punktakh* [Using groundwater for drinking water supply of settlements]. *Vodnye resursy Yuzhnogo Urala. Problemy vodokhozyaystvennogo kompleksa: sb. nauch. st. nauch.-prakt. konf* [Water Resources of the Southern Urals. Problems of the Water Management Complex: Proceed. of Scientific-Practical Conference]. Chelyabinsk, Chelyabinsk House of Scientists, pp. 164-167. (In Russian).

2. Nesterkina K.S., Nokhrin D.Yu., 2024. *Khimicheskiy sostav i kachestvo vody ryada skvazhin Chelyabinskoy oblasti po rezul'tatam biotestirovaniya* [Chemical composition and water quality of some wells in the Chelyabinsk region using biotesting]. *Vestnik Soveta molodykh uchennykh i spetsialistov Chelyabinskoy oblasti* [Bullet. of the Council of young scientists and specialists of the Chelyabinsk region], no. 1 (44), vol. 1, pp. 4-9, EDN: FLOPFQ. (In Russian).

3. Vasiliev A.A., Nokhrin D.Yu., Gasymov F.M., Glaz N.V., 2022. *Analiz agroklimaticheskikh usloviy Ural'skogo regiona za period s 1966 po 2020 gg. i perspektivnyy prognoz izmeneniya srednegodovoy temperatury do 2050 goda* [Analysis of agro-climatic conditions of the Ural region for the 1966–2020 and prospective forecast of changes in average annual temperature up to 2050]. *APK Rossii* [AIC of Russia], vol. 29, no. 2, pp. 139-147, DOI: 10.55934/2587-8824-2022-29-2-139-147, EDN: ZNTCDL. (In Russian).

4. Babichev A.N., Masny R.S., Balakai G.T., Dokuchaeva L.M., Gurina I.V., Yurkova R.E., Monastyrsky V.A., Olgarenko V.I., Selitsky S.A., Babenko A.A., 2023. *Povyshenie plodorodiya oroshaemykh zemel': nauch.-prakt. izd.* [Enhancing the Fertility of Irrigable Soils: Scientific and Practical Publication]. Moscow, Rosinformagrotekh Publ., 304 p. ISBN: 978-5-7367-1740-8. (In Russian).

5. Kiy M.S. Arslan H., 2021. Assessment of groundwater quality for irrigation and drinking using different quality indices and geostatistical methods in Çorum province (Turkey). *Irrigation and Drainage*, vol. 70, no. 4, pp. 871-886, DOI: 10.1002/ird.2593, EDN: QJNSOH.

6. Fallatah O., Khattab M.R., 2023. Evaluation of groundwater quality and suitability for irrigation purposes and human consumption in Saudi Arabia. *Water*, vol. 15, no. 13, article number: 2352, DOI: 10.3390/w15132352, EDN: HWDHDF.

7. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. 2001. Past: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, vol. 4, iss. 1, pp. 1-9.

8. Wickham H., Chang W., Henry L. [et. al.], 2024. ggplot2: Create elegant data visualizations using the grammar of graphics, apr. 23, 2024, available: <https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/index.html>, DOI: 10.32614/CRAN.package.ggplot2 [accessed 04.04.2025].

9. Dorian J., Lipka M., 2018. ggplot Piper Diagram, jan. 24, 2018, available: https://github.com/markolipka/ggplot_Piper [accessed 04.04.2025].

10. Nokhrin D.Yu., 2024. *Problema analiza dannykh s tsenzurirovannymi nablyudeniymi tipa «menee chem» v biologii i programmnoe obespechenie dlya ee resheniya* [The problem of data analysis with censored observations of the “less than” type in biology and software for its solution]. *Obrazovanie magistrrov: problemy i perspektivy razvitiya: tez. dokl. VII Vseros. konf.* [Master's Degree Education: Problems and Development Prospects: Report Summary of the VII All-Russian Conference]. Chelyabinsk, Chelyabinsk State University, pp. 89-95, EDN: DAYAKS. (In Russian).

11. Nokhrin D.Yu., Davydova N.A., 2020. *Gidrokhimicheskaya kharakteristika i kachestvo podzemnykh vod Sosnovskogo rayona Chelyabinskoy oblasti dlya tseley orosheniya* [Hydrochemical characteristics and irrigation quality of groundwater in the Sosnovsky district of the Chelyabinsk region]. *Agrarnyy vestnik Urala. Spetsial'nyy vypusk «Biologiya i biotekhnologii»* [Agrarian Bulletin of the Urals. Special Issue “Biology and Biotechnology”], S14, pp. 56-69, DOI: 10.32417/1997-4868-2021-14-56-69, EDN: EYDZFP. (In Russian).

12. Back W., 1961. Techniques for mapping hydrochemical facies. U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, Paper: 424-D, pp. 380-382.

13. Gribovsky G.P., Gribovsky Yu.G., Plokhikh N.A., 2003. *Biogeokhimicheskie provintsii Urala i problemy tekhnogeneza* [Biogeochemical provinces of the Urals and problems of technogenesis]. *Trudy biogeokhimicheskoy laboratorii. T. 24. Tekhnogenez i biogeokhimicheskaya evolyutsiya taksonov biosfery* [Transactions of the Biogeochemical Laboratory. Vol. 24. Technogenesis and Biogeochemical Evolution of Biosphere Taxons]. Moscow, Nauka Publ., pp. 174-187. (In Russian).

14. Priklonsky V.A., 1935. *Izuchenie fizicheskikh svoystv i khimicheskogo sostava podzemnykh vod* [Study of the Physical Properties and Chemical Composition of Groundwater]. Moscow; Leningrad, Geological Exploration and Geodetic Literature Publ., 60 p. (In Russian).

15. Grujic T., Pivic R., Maksimovic J., Sebic A.S., Dinic Z., Jaramaz D., Jojevic S.T., 2021. Sustainable agriculture and sustainability of water resources from the aspect of environmental protection. *Ecocycles*, vol. 7, no. 1, pp. 88-94, DOI: 10.19040/ecocycles.v7i1.202, EDN: YTAENS.

16. Serge Gaëtan S.É., Marie Michelle C.H., Ouindinboudé Jacques K., Poulouma Louis Y., Idriss S., 2022. Hydrogeochemistry of shallow groundwater and suitability to irrigation: the case of the Karfiguéla Paddy field in Burkina Faso. *Water*, vol. 14, no. 16, article number: 2574, DOI: 10.3390/w14162574, EDN: SHFYBK.

17. Drovovozova T.I., Krasovskaya N.N., 2023. *Dinamika irrigatsionnogo kachestva orositel'noy i drenazhno-sbrosnykh vod Nizhne-Donskoy orositel'noy sistemy v 1972 i 2019–2021 godakh* [Dynamics of irrigation quality of irrigation and drainage-waste waters of the Lower Don irrigation system in 1972 and 2019–2021]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 13, no. 1, pp. 87-100, DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-1-87-100, EDN: NXUHIW. (In Russian).

18. Melentiev E., Rotaru M., 2023. Anthropogenic influence on the water resource quality in the village of Bălănești, Nisporeni district. *Acta et Commentationes, Exact and Natural Sciences*, vol. 15, no. 1, pp. 78-87, DOI: 10.36120/2587-3644.v15i1.78-87, EDN: WZSOYW.

19. Semenischev V.S., Titova S.M., Voronina A.V., 2020. *Opredelenie kachestva vody v rodnikakh Yekaterinburga i Sverdlovskoy oblasti* [Determination of water quality in springs of Yekaterinburg and Sverdlovsk region]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii* [Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management], no. 5, pp. 126-138, DOI: 10.35567/1999-4508-2020-5-8, EDN: ZRKGNH. (In Russian).

20. Maksimovich N.G., Kazakevich S.V., Blinov S.M., 2001. *Gidrogeologicheskie usloviya zapadnoy chasti Kurganskoy oblasti* [Hydrogeological conditions of the western part of Kurgan region]. *Vestnik Permskogo universiteta* [Bulet. of Perm University], iss. 3 (Geology), pp. 159-178. (In Russian).

Информация об авторах

Д. Ю. Нохрин – ведущий научный сотрудник, кандидат биологических наук, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (620142, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Белинского, д. 112А), nokhrin8@mail.ru, AuthorID: 397913, ORCID: 0000-0002-4920-2338;

Н. А. Давыдова – научный сотрудник, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (620142, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Белинского, д. 112А), natascha.dawidowa@yandex.ru, AuthorID: 502430, ORCID: 0000-0002-3922-6141.

Information about the authors

D. Yu. Nokhrin – Leading Researcher, Candidate of Biological Sciences, Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (620142, Sverdlovsk Region, Yekaterinburg, Belinsky Street, 112A), nokhrin8@mail.ru, AuthorID: 397913, ORCID: 0000-0002-4920-2338;

N. A. Davydova – Researcher, Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (620142, Sverdlovsk Region, Yekaterinburg, Belinsky Street, 112A), natascha.dawidowa@yandex.ru, AuthorID: 502430, ORCID: 0000-0002-3922-6141.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.05.2025; одобрена после рецензирования 26.08.2025; принята к публикации 25.09.2025.

The article was submitted 26.05.2025; approved after reviewing 26.08.2025; accepted for publication 25.09.2025.