

Оригинальная статья / Original article

УДК553.4:915.46

DOI: 10.18470/1992-1098-2026-1-12



Классификация типов подземных вод в районе Пакокку в центральной части Мьянмы

Мин О. Со¹, Людмила В. Боронина², Константин В. Белов¹, Нухкади И. Рабазанов^{3,4},
Аркадий Ф. Сокольский⁵, Валерий Р. Волошин¹

¹Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

³Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН, Махачкала, Россия

⁴Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

⁵Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, Астрахань, Россия

Контактное лицо

Мин О. Со, аспирант, гидрогеологический факультет, Российский государственный геологоразведочный университет; 117485 Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23. Тел. +79855210116

Email minnoaksoe95@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0009-0000-6252-9880>

Формат цитирования

Со М.О., Боронина Л.В., Белов К.В., Рабазанов Н.И., Сокольский А.Ф., Волошин В.Р. Классификация типов подземных вод в районе Пакокку в центральной части Мьянмы // Юг России: экология, развитие. 2026. Т.21, N 1. С. 138-154. DOI: 10.18470/1992-1098-2026-1-12

Получена 3 октября 2025 г.

Прошла рецензирование 17 ноября 2025 г.

Принята 25 декабря 2025 г.

Резюме

Целью исследования было проведение гидрогеологической и гидрохимической оценки подземных вод в районе Пакокку (Центральная Мьянма) для классификации их типов и определения пригодности для орошения сельскохозяйственных земель.

Проанализированы пробы подземных вод из 17 буровых скважин, приуроченных к аллювиальным и ирравадийским водоносным горизонтам. Полевые параметры (рН, температура, электропроводность (ЕС), общее содержание растворённых веществ (TDS)) измерялись *in situ*, а концентрации основных ионов определялись стандартными лабораторными методами. Гидрохимические фации интерпретировались с использованием диаграмм Пайпера и Чадхи, тогда как пригодность для орошения оценивалась на основе индексов (SAR, SSP, RSBC, MAR, PS, KR, PI), а также диаграмм Ричардса и Уилкокса.

Выявлены два водоносных горизонта: аллювиальный и ирравадийский. Преобладает тип воды Ca-Mg-Cl-SO₄ (82 % проб), с небольшими примесями Ca-Mg-HCO₃ и Ca-Mg-SO₄, что подтверждает жесткость воды и отсутствие остаточного карбоната натрия, что благоприятно для орошения. Электропроводность воды (ЕС) варьируется от 480 до 1100 мкСм/см, а коэффициент адсорбции натрия (SAR) составляет 0,99–2,04. По диаграммам Ричардса вода в основном относится к категориям C2-S1 и C3-S1, что указывает на низкий риск натриевой опасности, но на среднюю или высокую соленость. Оценка других параметров (SSP, RSBC, MAR, PS, KR, PI) показала, что 14 из 17 проб пригодны для орошения. Три пробы (РПК-3, РПК-9, РПК-17) признаны непригодными из-за высоких показателей солености и магния.

Подземные воды региона преимущественно пресные, с умеренной минерализацией, подходят для сельского хозяйства при контроле за минерализацией и выборе солеустойчивых культур.

Ключевые слова

Классификация подземных вод, гидрогеохимия, качество подземной воды; диаграмма Пайпера, диаграмма Чадха, коэффициент адсорбции натрия (SAR), индекс проницаемости (PI), коэффициент адсорбции магния (MAR), потенциальная соленость (PS), центральная Мьянма, район Пакокку, формация Иравади, аллювиальный водоносный горизонт.

Classification of groundwater types in Pakokku district in central Myanmar

Min O. Soe¹, Liudmila V. Boronina², Konstantin V. Belov¹, Nukhadi I. Rabazanov^{3,4},
Arkady F. Sokolsky⁵ and Valery R. Voloshin¹

¹Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

²Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

³Caspian Institute of Biological Resources, Dagestan Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia

⁴Dagestan State University, Makhachkala, Russia

⁵Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Astrakhan, Russia

Principal contact

Min O. Soe, PhD student, Hydrogeological Faculty,
Russian State Geological Exploration University;
23 Miklukho-Maklaya St, Moscow, Russia 117485.
Tel. +79855210116

Email minnoaksoe95@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0009-0000-6252-9880>

How to cite this article

Soe M.O., Boronina L.V., Belov K.V., Rabazanov N.I.,
Sokolsky A.F., Voloshin V.R. Classification of
groundwater types in Pakokku district in central
Myanmar. *South of Russia: ecology, development*.
2026; 21(1):138-154. (In Russ.)
DOI: 10.18470/1992-1098-2026-1-12

Received 3 October 2025

Revised 17 November 2025

Accepted 25 December 2025

Abstract

This study aimed to undertake a comprehensive hydrogeological and hydrochemical assessment of groundwater in the Pakokku area, Central Myanmar, to classify water types, identify dominant hydrochemical facies and evaluate suitability for irrigation under arid conditions.

Groundwater samples from 17 bore wells, representing alluvial and Irrawaddy aquifers, were analysed. Field parameters (pH, temperature, EC, TDS) were measured in situ, and major ions were determined using standard laboratory methods. Hydrochemical facies were interpreted using Piper and Chadha diagrams, while irrigation suitability was assessed through indices (SAR, SSP, RSBC, MAR, PS, KR, PI) and Richards and Wilcox diagrams.

Results indicate two dominant facies: Ca–Mg–Cl–SO₄ and Ca–Mg–HCO₃, with 82% of samples belonging to the former, reflecting carbonate and silicate weathering. EC ranges from 480–1100 µS/cm and TDS from 310–715 ppm, indicating fresh to slightly mineralised water. SAR values (0.99–2.04) and SSP (<40%) classify most samples as excellent to good. Most waters fall within C2–S1 and C3–S1 fields, showing moderate salinity and low sodium hazard.

Overall, the groundwater of 14 of 17 samples is suitable for irrigation, while three show elevated salinity or magnesium hazard. Groundwater in general is assessed as fresh, stable and suitable for sustainable agricultural use with proper salinity management.

Key Words

Groundwater classification, hydrogeochemistry, irrigation water quality; Piper diagram, Chadha diagram, sodium adsorption coefficient (SAR), permeability index (PI), magnesium adsorption coefficient (MAR), potential salinity (PS), central Myanmar, Pakokku, Irrawaddy Formation, alluvial aquifer.

ВВЕДЕНИЕ

Мьянма является крупнейшей материковой страной в Юго-Восточной Азии, ее общая площадь составляет 676 557 км². Соседними странами являются Китай, Индия, Таиланд, Лаос и Бангладеш. Мьянма обладает богатыми водными ресурсами, которые испытывают минимальную нехватку воды. Как правило, среднегодовое количество осадков в Мьянме колеблется в пределах 1000–1500 мм и варьируется в зависимости от различных районов или областей [1].

Таким образом, объем подпитки подземных вод осадками также варьируется в зависимости от конкретного местоположения. В Мьянме есть четыре основные речные системы: Айяравади, Танлвин, Чиндуин и Ситтаунг. Кроме того, около 90 % территории страны разделено на восемь речных бассейнов, которые подпитывают подземные воды, что дает общий потенциал подземных вод в размере ~ 495 км³/год (Рис. 1).



Рисунок 1. Карта расположения Мьянмы
Figure 1. Myanmar location map

Наиболее продуктивной является дельтовая часть реки Айяравади и прилегающие к ней территории. На бытовые нужды используют 60 % от всех запасов воды. В этом районе питание подземных вод осуществляется, в основном, за счет осадков и инфильтрация поверхностных вод.

Регион Мьянмы можно разделить на четыре линейных геоморфологических пояса, расположенных с севера на юг. А именно, Восточное нагорье, Центральная низменность, Западные хребты и прибрежная равнина Ракхайн. Эти пояса являются простым отражением лежащей в их основе стратиграфии и структуры, поскольку каждый из них содержит литологические и структурно связанные группы горных пород [2]. Таким образом, они также рассматривали как отдельные геотектонические провинции блок Шан-Танинтари, Центральные кайнозойские пояса, Западный складчатый пояс и прибрежный пояс Ракхайн [2].

Центральный кайнозойский пояс подчеркнут различными упорядоченными последовательностями кайнозойских осадочных толщ. Встречаются некоторые

магматические и метаморфические породы. Кайнозойские породы можно разделить на эоценовую группу, олигоцен-миоценовую группу (группа Пега), миоцен-плиоценовую (формация Иравади) [2]. Региональные геологические условия исследования приведены в таблице 1.

Территория в целом относится к Центральному кайнозойскому поясу. В частности, она расположена в бассейне Минбу, в котором залегают третичные обломочные отложения большой мощности. Эта область в основном покрыта слоями песчаника, алевролита и сланца формации Иравади «мио-плиоцен», гравийными отложениями и террасами «плейстоцен», а также недавними аллювиальными отложениями, состоящими в основном из рыхлого песчаного грунта, илистой почвы и илстых или мергелистых отложений [3]. Региональная геологическая карта, взятая из миллионной геологической карты Мьянмы, также показана на рисунке 2. Горные породы на исследуемой территории можно разделить на аллювий, иравадийскую формацию и группу Перу [3].

Таблица 1. Региональная стратиграфия района

Table 1. Regional stratigraphy of the area

	Серия систем System Series	Стратиграфические Stratigraphic Unit	Литология Lithology	Выставленный в исследуемой зоне Exposed in study area
ЧЕТВЕРТИЧНЫЙ / QUATERNARY	Недавний Recent	Более молодой аллювий Younger alluvium	Желтая аллювиальная глина, ил, песок и гравий (в некоторых местах темно-серая почва) Yellow Alluvial clay, silt, sand, and gravel (in some place dark grey soil)	Рядом с Каммой Near Kamma
	Плейстоцен Pleistocene	Более древний аллювий Older alluvium	Темно-коричневая среднеилистая почва, илисто-глинистая почва до красновато-коричневой илистой почвы и гравия Dark brown mediumsilty soil, silty clay soil to reddish brown silty soil and gravel	Рядом с пагодой Лея Таунгу Near Leya Taungoo Pagoda
ТРЕТИЧНЫЙ / TERTIARY	От верхнего миоцена до нижнего плейстоцена Upper Miocene to Lower Pleistocene	Формирования Иравади Irrawaddy Formation	Плохо укрепленный песчаник желтоватого цвета с прослоями песка и гальки, а также небольшими слоями песчаной глины и сланца Poorly consolidated buff colour sandstone interbedded with gritty and pebbly beds and minor sandy clay and shale layers	Рядом с пагодой Лея Таунгу Near Leya Taungoo Pagoda
	Верхний олигоцен Upper Oligocene	Группа Пегу Pegu Group	Массивные глинистые и конгломератные песчаники бурого цвета с примесью песчаных сланцев и твердых ракушечниковых известняков Buff-coloured, massive, argillaceous and conglomeratic sandstone with sandy shales and hard shelly limestones	Недалеко от деревни Кюн Чаунг Near Kyun Chaung Village

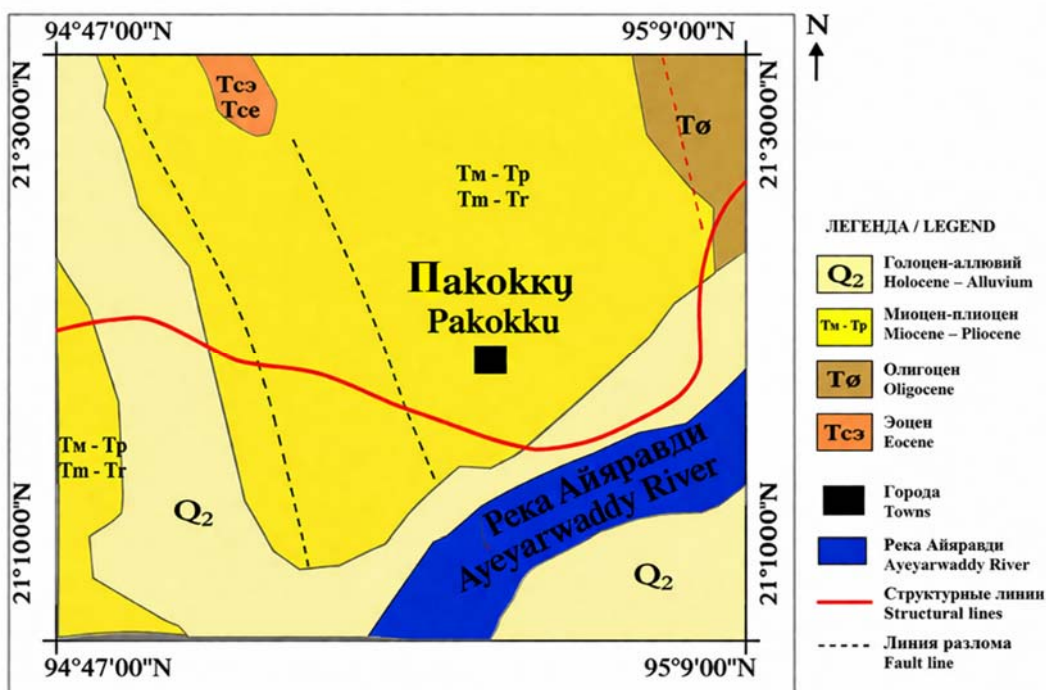


Рисунок 2. Геологическая карта района Пакокке

Figure 2. Geological map of Pakokku district

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Типы подземных вод классифицируются по диаграммам Пайпера и Чадха. Классификация воды по диаграмме Пайпера основана на процентном содержании эквивалента на миллион и представлена на трехлинейной диаграмме отдельно для катионов и

анионов. Согласно классификации метода Пайпера, в пробах воды из водоносного горизонта отмечен тип $Ca^{2+}-Mg^{2+}-Cl^{-}$ и тип $Ca^{2+}-Mg^{2+}-HCO_3^{-}$. Водный разрез типа HCO_3^{-} доминирующий $Ca^{2+}-Mg^{2+}$ и Cl^{-} доминирующий $Ca^{2+}-Mg^{2+}$. К второстепенным типам воды относятся $Ca^{2+}-Mg^{2+}-Cl^{-}-HCO_3^{-}$ тип. Это показано на рисунке 3 и 4.

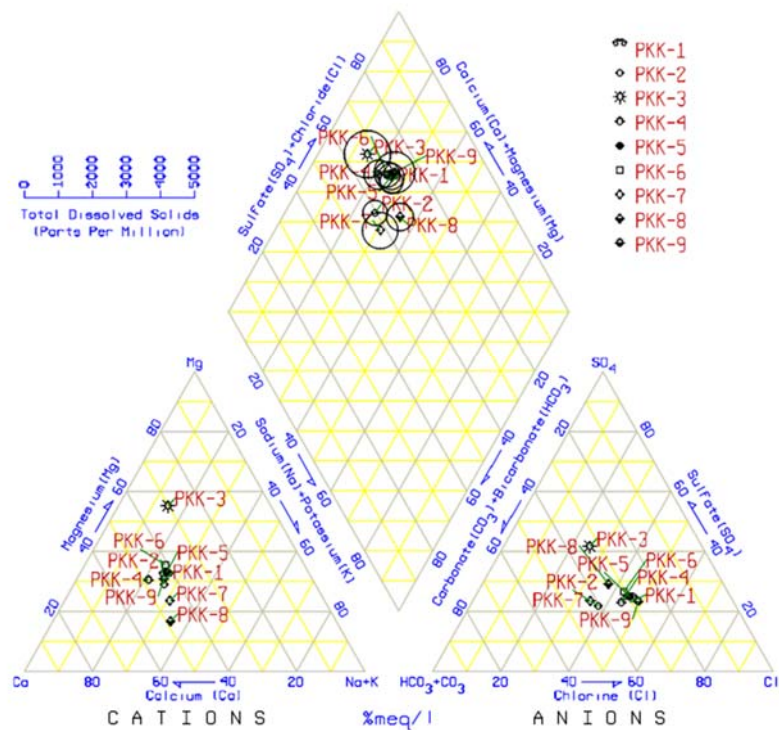


Рисунок 3. Схема для подземных вод в районе Пакоку 1
Figure 3. Scheme for groundwater in Pakokku area 1

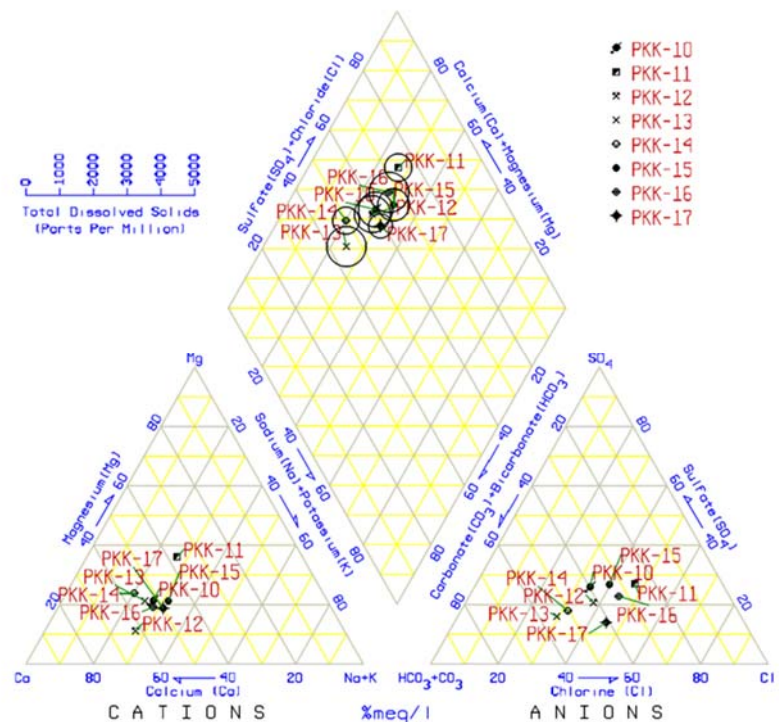


Рисунок 4. Схема для подземных вод в районе Пакоку 2
Figure 4. Scheme for groundwater in Pakokku area 2

Анализ диаграмм Пайпера (рисунки 3 и 4) показывают, что подземные воды в районе Пакокку характеризуются смешанным катионным составом с преобладанием кальция и магния, в то время как анионный состав варьируется между бикарбонатным и хлоридным типами, что указывает на взаимодействие воды с карбонатными и силикатными породами, а также на возможное влияние испарения или антропогенного загрязнения в определенных зонах водоносного горизонта.

Чтобы систематизировать и наглядно представить гидрохимический состав подземных вод на исследуемой территории, они были классифицированы по методу Пайпера, результаты которого представлены в таблице 2. Эта таблица позволяет нам определить преобладающие гидрохимические типы вод и их пространственное распределение по скважинам, что является основой для оценки генезиса минерализации и потенциальной пригодности вод для различных видов использования.

Таблица 2. Химическая классификация типа подземных вод по методу Пайпера Региональная стратиграфия района
Table 2. Chemical classification of groundwater type by Piper's method – Regional stratigraphy of the area

Номер No	Номер скважины Well No	Тип Type	Тип воды по методу Пайпера Water Type by Piper Method
1	ПКК – 1/ РКК – 1	IV	Ca-Mg-Cl-SO ₄
2	ПКК – 2/ РКК – 2	IV	Ca-Mg-Cl-SO ₄
3	ПКК – 3/ РКК – 3	V	Ca-Mg-SO ₄
4	ПКК – 4/ РКК – 4	IV	Ca-Mg-Cl-SO ₄
5	ПКК – 5/ РКК – 5	IV	Ca-Mg-Cl-SO ₄
6	ПКК – 6/ РКК – 6	IV	Ca-Mg-Cl-SO ₄
7	ПКК – 7/ РКК – 7	IV	Ca-Mg-Cl-SO ₄
8	ПКК – 8/ РКК – 8	IV	Ca-Mg-Cl-SO ₄
9	ПКК – 9/ РКК – 9	IV	Ca-Mg-Cl-SO ₄
10	ПКК – 10/ РКК -10	IV	Ca-Mg-Cl-SO ₄
11	ПКК – 11/ РКК – 11	IV	Ca-Mg-Cl-SO ₄
12	ПКК – 12/ РКК – 12	IV	Ca-Mg-Cl-SO ₄
13	ПКК – 13/ РКК – 13	I	Ca-Mg-HCO ₃
14	ПКК – 14/ РКК – 14	I - IV	Ca-Mg-HCO ₃ -Cl-SO ₄
15	ПКК – 15/ РКК – 15	IV	Ca-Mg-Cl-SO ₄
16	ПКК – 16/ РКК – 16	IV	Ca-Mg-Cl-SO ₄
17	ПКК – 17/ РКК – 17	IV	Ca-Mg-Cl-SO ₄

Абсолютное большинство проб (14 из 17, что составляет около 82 %) относятся к типу IV по классификации Пайпера с химической формулой Ca-Mg-Cl-SO₄. Это указывает на то, что подземные воды в основном обладают смешанным катионным (кальциево-магниевым) и смешанным анионным (хлоридно-сульфатным) составом.

Классификация воды по диаграмме Чадха основана на разнице в миллиэквивалентных процентах между щелочноземельными (кальций плюс магний) и щелочными металлами (натрий плюс калий),

выраженной в процентах от значений реакции, нанесенных на ось X, и разнице в миллиэквивалентных процентах между слабокислыми анионами (карбонат плюс бикарбонат) и сильноокислыми анионами (хлорид плюс сульфат) нанесены на ось Y. Результирующая область исследования представляет собой квадрат или прямоугольник, в зависимости от размера шкал, выбранных для координат X и Y. Согласно диаграмме Чадха, тип воды в более молодом аллювиальном водоносном горизонте относится к типу Ca-Mg-Cl. Это показано на рисунках 5 и 6.

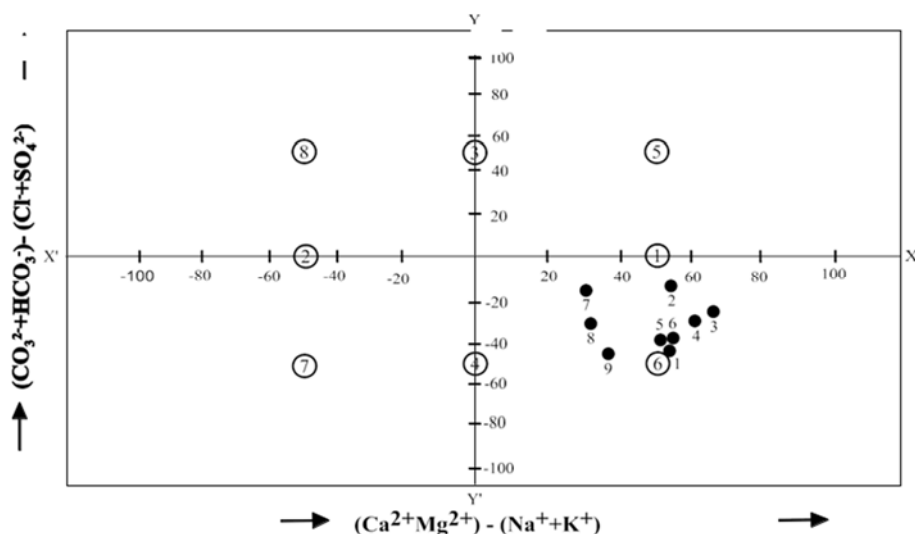


Рисунок 5. Классификация типов воды по диаграмме Чадха в водоносном горизонте 1
Figure 5. Classification of water types according to the Chadha diagram in the aquifer 1

Щелочноземельные металлы превосходят щелочные металлы, а сильнокислые анионы превосходят слабокислые анионы. Такая вода обладает постоянной жесткостью и не образует остаточного карбоната натрия

при орошении. Положения точек данных на предложенной диаграмме соответствуют Ca²⁺ - Mg²⁺ - Cl⁻ типу, Ca²⁺ - Mg²⁺ воды доминирующего Cl⁻ типа, или Cl⁻ воды доминирующего Ca²⁺ - Mg²⁺ типа.

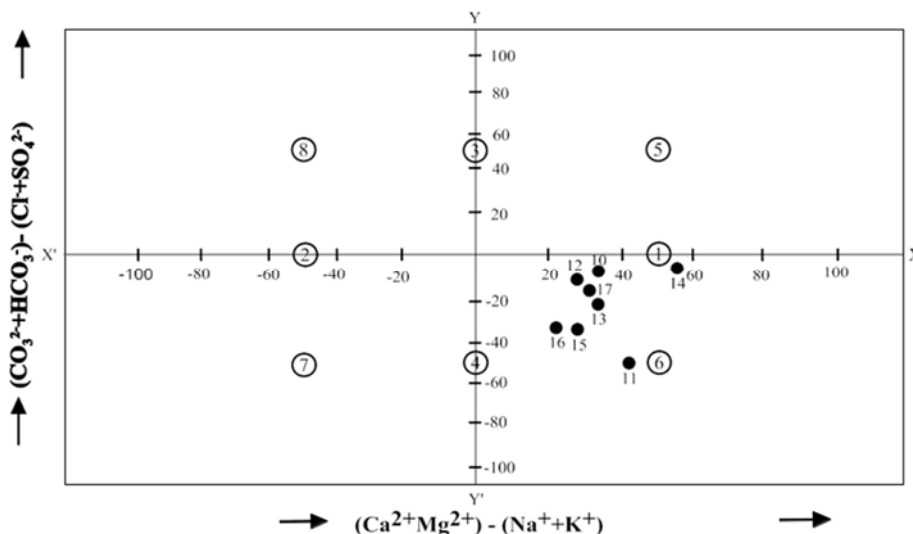


Рисунок 6. Классификация типов воды по диаграмме Чадха в водоносном горизонте 2
Figure 6. Classification of water types according to the Chadha diagram in the aquifer 2

На основании диаграммы Чадха установлено, что подземные воды аллювиального горизонта относятся к кальциево-магниевому-хлоридному типу (Ca-Mg-Cl), что характеризуется преобладанием щелочноземельных металлов над щелочными и сильнокислых анионов над слабокислыми; такая вода обладает постоянной жесткостью и, что критически важно для сельского хозяйства, не образует остаточного карбоната натрия при орошении, что предотвращает засоление и деградацию почв.

Критерии качества оросительной воды зависят от типа растений, количества используемой оросительной воды, почвы и климата, поскольку некоторые растения очень чувствительны к определенной концентрации того или иного элемента в оросительной воде. Количество воды, доступное для промывки орошаемой почвы, имеет решающее значение для появления побочных эффектов, таких как увеличение содержания нежелательных соединений в верхнем слое почвы [6]. Состояние почвы и климата в конечном счете определяют степень опасности неблагоприятных последствий. Высокое испарение и низкая проницаемость почвы приводят к плохому дренажу и опасному накоплению соленой почвенной влаги. В этом случае потребуется большое количество воды для промывки [6].

При оценке качества воды для орошения натрия является важным фактором. Высокое содержание Na в воде по отношению к Ca + Mg приводит к нарушению структуры почвы, и она становится более пластичной, что ограничивает движение воды. Возникнут проблемы с дренажем, и в конечном счете культивация станет невозможной. Карта расположения скважин на исследуемой территории приведена на рисунке 7.

Классификация по коэффициенту адсорбции натрия «SAR»; Соотношение Na основано на коэффициенте адсорбции натрия «S.A.R» почвенным раствором и определяется по формуле 1

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

Для скважин № 1 «S.A.R» составил,

$$= \frac{1.3}{\sqrt{\frac{2.3 + 7.5}{2}}} = 1.35 \text{ мэкв/л}$$

Диаграмма Ричардса является стандартным инструментом для комплексной диаграмме оценки качества оросительной воды, одновременно учитывающим риск засоления почвы (с точки зрения удельной электропроводности – ЕС) и риск засоления из-за воздействия натрия (с точки зрения коэффициента адсорбции натрия – SAR). Размещение данных о воде на этой диаграмме позволяет отнести ее к одному из классов, определяющих потенциальную опасность для почв и растений и, соответственно, необходимые агрономические мероприятия и представил в таблице 3.

Вода с низкой соленостью «C1» может использоваться для орошения большинства сельскохозяйственных культур на большинстве почв, где вероятность засоления почвы невелика. Требуется некоторое промывание, но это происходит при обычном орошении, за исключением почв с чрезвычайно низкой водопроницаемостью.

Вода средней солености «C2» может использоваться при умеренном вымывании. Растения с умеренной солеустойчивостью в большинстве случаев можно выращивать без специальных мер по контролю солености.

Вода с высокой соленостью «C3» нельзя использовать на почвах с ограниченным дренажем. Даже при достаточном дренаже может потребоваться специальный уход для контроля засоления и следует выбирать растения с хорошей солеустойчивостью.

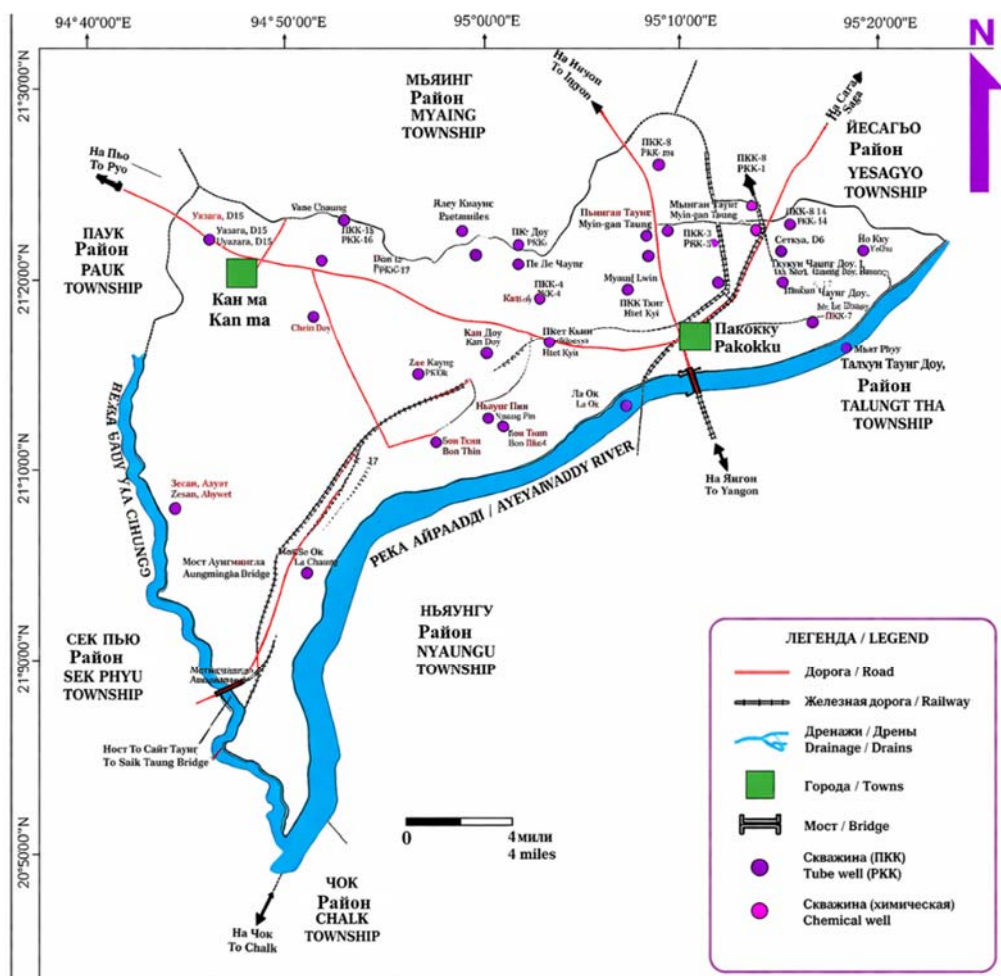


Рисунок 7. Карта расположения скважин на исследуемой территории
 Figure 7. Map of the location of wells in the study area

Вода с очень высокой соленостью «С4» не подходит для орошения в обычных условиях, но может использоваться время от времени при особых обстоятельствах. Почва должна быть водопроницаемой, дренаж должен быть достаточным, поливная вода должна подаваться в избытке, чтобы обеспечить значительное промывание, и следует

выбирать культуры, обладающие высокой солеустойчивостью.

Исходя из SAR, поливную воду можно разделить на четыре категории в зависимости от щелочного эффекта. Классификация подземных вод приведена в таблице 3.

Таблица 3. Классификация подземных вод на основе Na %
 Table 3. Classification of groundwater based on Na %

Классификация воды по содержанию натрия Classification of water by sodium content	(Na %) Процентное содержание натрия (Na %) Percentage of sodium	Категории подземных вод по содержанию натрия Categories of groundwater by sodium content
S1	<20	Отлично / Excellent
S2	20–40	Хорошо / Good
S3	40–60	Допустимый / Permissible
S4	60–80	Сомнительный / Doubtful
	>80	Неподходящий / Unsuitable

Вода с низким содержанием натрия «S1» может использоваться для орошения практически на всех почвах с небольшим риском образования вредных концентраций натрия.

Среда-натриевая вода «S2» может вызвать проблемы с подщелачиванием в почвах с тонкой структурой в условиях слабого выщелачивания. Может использоваться на почвах с грубой структурой и хорошей проницаемостью.

Вода с высоким содержанием натрия «S3» может вызвать проблемы со щелочностью. Такая вода требует особого ухода за почвой, такого как хороший дренаж, интенсивное промывание и использование химических добавок, таких как гипс.

Вода с очень высоким содержанием натрия «S4» обычно не подходит для орошения. Это может привести к проблемам со щелочностью.

Анализ данных о процентном содержании натрия (Na %) в соответствии с классификацией, приведенной в таблице 3, показал, что все исследованные подземные воды относятся к категориям "отличные" (Na % < 20) и "хорошие" (Na% = 20–40), что указывает на низкое содержание натрия и, как следствие, в результате существует минимальный риск ухудшения физических свойств почв, таких как снижение водопроницаемости и образование корки, что делает эти воды в целом благоприятными для использования в орошаемом земледелии.

Степень минерализации подземных вод можно определить по значению электропроводности (ЕС). Допустимый предел составляет 1500 мг/л. В районе проведения исследований значение ЕС колеблется от 480 мкмоль/см³ в деревне Маджикоепин до 1100 мкмоль/см³ в деревне Пантаингчоне. Значения всех образцов находятся в допустимых пределах. Распределение электропроводности и коэффициента адсорбции натрия по скважинам, представлены на рисунке 8.

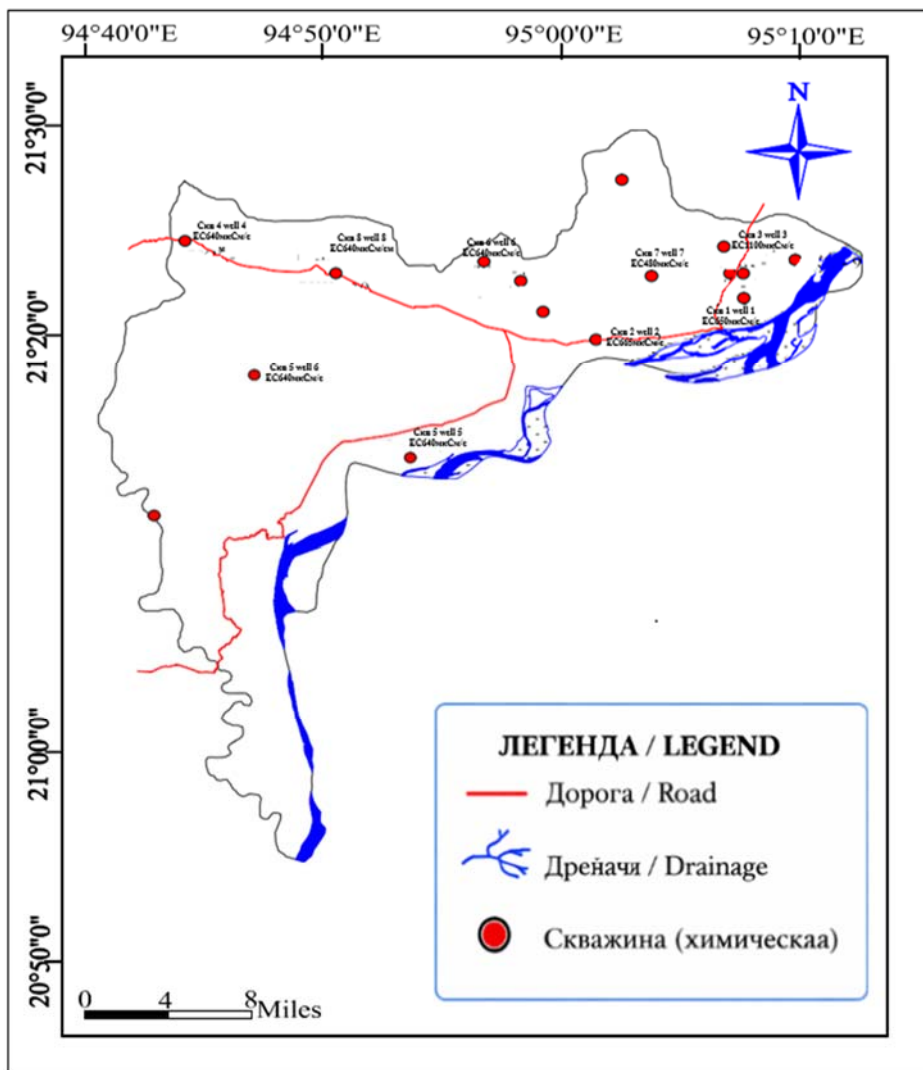


Рисунок 8. Распределение электропроводности подземных вод на исследуемой территории
Figure 8. Electrical conductivity distribution of groundwater in the study area

Значение и интерпретация оценок класса качества на диаграмме представлены следующим образом. На основе ЕС вода для орошения может быть разделена на четыре категории в зависимости от солевого эффекта. Соотношение между удельной электропроводностью и коэффициентом адсорбции натрия на исследуемой территории представлены в таблице 4.

Анализ данных, приведенных в таблице 4, показывает, что все значения коэффициента адсорбции натрия (SAR) для исследуемых скважин находятся в низком диапазоне от 0,99 до 2,04, что соответствует классу S1 (вода с низким содержанием натрия) и указывает на минимальный риск засоления почвы, что в совокупности позволяет рекомендовать эти воды для

орошения большинства сельскохозяйственных культур при условии контроля общей минерализации в районах с самыми высокими значениями ЕС.

Однако, все пробы подземных вод относятся к областям C2-S1 и C3-S1, что указывает на воду со средней и высокой соленостью, но с низким риском воздействия натрия. Это означает, что основным ограничивающим фактором при использовании этих вод для орошения является общая минерализация, а не риск засоления, и устойчивое сельское хозяйство потребует от умеренной до интенсивной промывки почвы, а также выбора солеустойчивых культур, особенно для скважин с классификацией C3, то к ним относятся скважины №№ 3, 9 и 17. (см. рис. 7)

Таблица 4 Соотношение между удельной электропроводностью и коэффициентом адсорбции натрия в исследуемой области

Table 4 Relationship between the specific electrical conductivity and the coefficient of sodium adsorption in the study area

Номер No	Номер скважины Well No	Удельная электропроводность (ЕС), мкСм/см Electrical Conductivity(ЕС) μ S/cm	Коэффициент адсорбции натрия (SAR), (ммоль/л) ^{0.5} Sodium Adsorption Ratio (SAR) (mmol/L) ^{0.5}
1	ПКК – 1/ РКК – 1	650	1,35
2	ПКК – 2/ РКК – 2	665	1,43
3	ПКК – 3/ РКК – 3	1100	0,99
4	ПКК – 4/ РКК – 4	640	1,20
5	ПКК – 5/ РКК – 5	645	1,36
6	ПКК – 6/ РКК – 6	640	1,24
7	ПКК – 7/ РКК – 7	480	2,00
8	ПКК – 8/ РКК – 8	700	2,04
9	ПКК – 9/ РКК – 9	980	1,79
10	ПКК – 10/ РКК – 10	780	1,77
11	ПКК – 11/ РКК – 11	650	1,52
12	ПКК – 12/ РКК – 12	790	1,75
13	ПКК – 13/ РКК – 13	800	1,68
14	ПКК – 14/ РКК – 14	500	1,12
15	ПКК – 15/ РКК – 15	800	2,02
16	ПКК – 16/ РКК – 16	700	1,99
17	ПКК – 17/ РКК – 17	1050	1,72

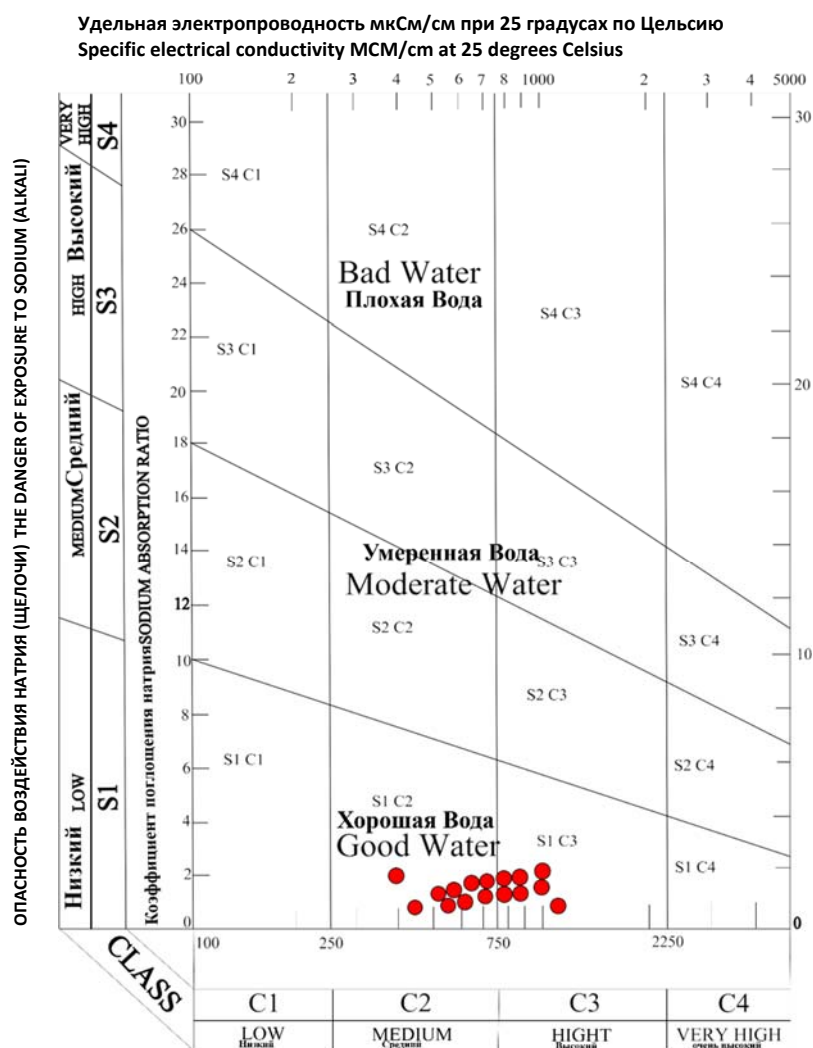


Рисунок 9. Оценка проб воды в зависимости от солёности и опасности содержания натрия в водоносном горизонте
Figure 9. Assessment of water samples depending on salinity and the danger of sodium content in the aquifer [after Richards]

Процент растворимого натрия «S.S.P»; Концентрация натрия играет важную роль в оценке качества грунтовых вод для орошения, поскольку натрий повышает твердость почвы, а также снижает ее проницаемость. Процентное содержание натрия (Na %) рассчитывается по формуле 2,

$$SSP = \frac{Na^+ + K^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} \times 100$$

Для скважин № 1 процентное содержание натрия составил,

$$= \frac{(1.348 + 0.067)}{2.320 + 1.658 + 1.348 + 0.067} \times 100 = 26\%$$

Пригодность подземных вод в зависимости от содержания Na в процентах классифицируется путем сопоставления содержания Na в процентах с общей концентрацией мэкв/л на диаграмме Уилкокса [8]. Согласно диаграмме Уилкокса, большинство проб воды из водоносного горизонта оцениваются как отличные, так и хорошие, а также как допустимые (рис. 9).

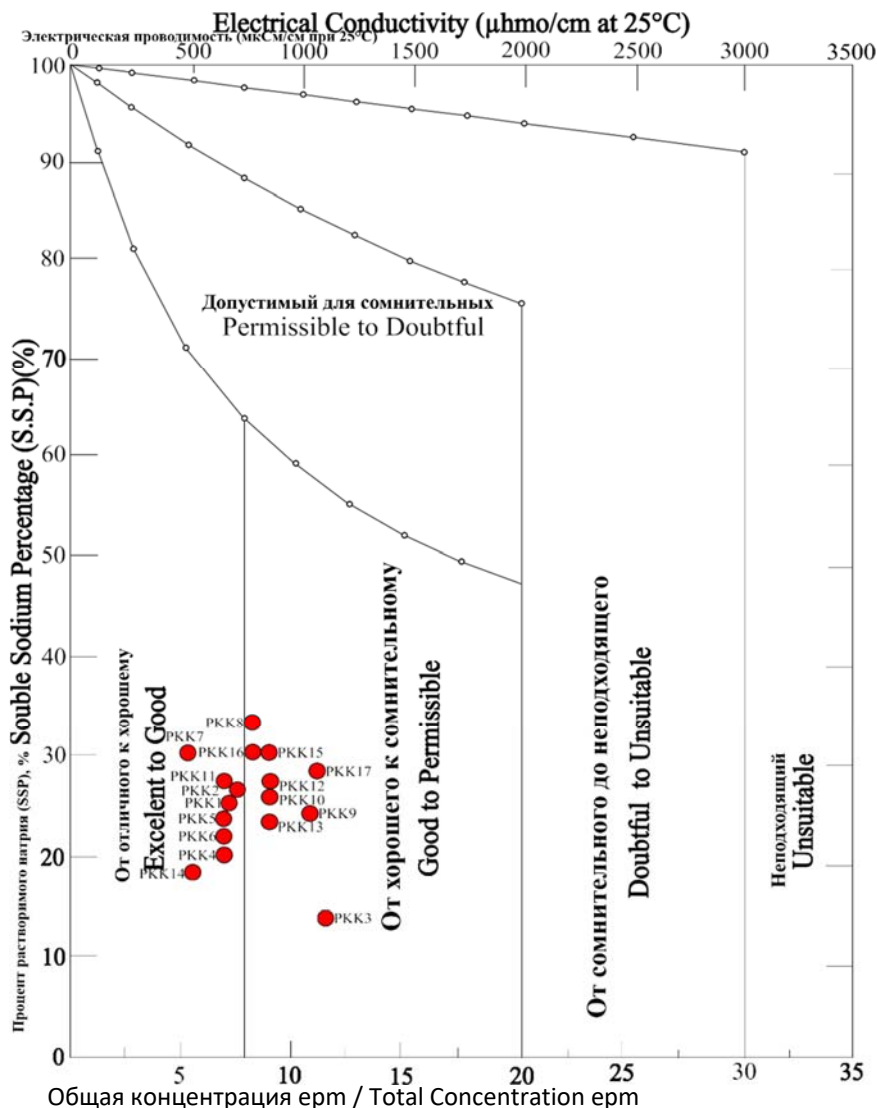


Рисунок 10. Анализ оросительной воды по электропроводности «ЕС» и процентному содержанию растворимого натрия «SSP» в водоносном горизонте «по диаграмме Уилкоксу»
Figure 10. Analysis of irrigation water by electrical conductivity "EC" and the percentage of soluble sodium "SSP" in the aquifer "according to the Wilcox diagram"

Согласно диаграмме Уилкокса (рис. 10), большинство проб подземных вод из исследуемого водоносного горизонта попадают в зоны, классифицируемые как "отличные" и "хорошие" по качеству для орошения, что указывает на благоприятное соотношение электропроводности (ЕС) и процентного содержания растворимого натрия (SSP), а также на наличие некоторых образцов в категории "приемлемые" указывается на необходимость выбора соответствующих культур и почвенных условий для их успешного использования в сельском хозяйстве.

Остаточный бикарбонат натрия «RSBC»; Концентрация бикарбоната и карбонатной кислоты влияет на пригодность воды для орошения. Таким образом, вода с высоким содержанием «RSBC» имеет высокий уровень Са; орошение земель такой водой становится неплодородным из-за отложения карбоната натрия.

Содержание остаточного карбоната натрия в пробах воды из водоносного горизонта «RSBC» составляет от -4,217 до -0,983 мэкв/л. Пробы воды из

этого водоносного горизонта безопасны для орошения и определяется по формуле 3.

$$RSBC = HCO_3^- + Ca^{2+} \text{ (мэкв/л)}$$

Для скважин № 1 содержание остаточного бикарбоната натрия составил,

$$= 1.115 - 2.320$$

$$= -1.206 \text{ мэкв/л}$$

Классификация Eaton, основанная на остаточном содержании бикарбоната натрия, приведена в таблице 5.

Таблица 5. Классификация, основанная на остаточном содержании бикарбоната натрия

Table 5. Classification based on the residual content of sodium bicarbonate

Остаточный бикарбонат натрия «мэкв/л» Residual Sodium bicarbonate (meq / L)	Классификация Classification
<1,25	Отлично / Excellent
1,25–2,5	Хорошо / Good
2,5–3	Справедливый / Fair
>3	Бедный / Poor

Согласно классификации Eaton, все пробы грунтовых вод с отрицательными значениями остаточного содержания бикарбоната натрия (RSBC) в диапазоне от -4,217 до -0,983 классифицируются как "отличные", что указывает на отсутствие риска отложения карбоната натрия в почве и подтверждает высокую пригодность этих вод для орошения без риска ухудшения физических свойств и плодородия почвы.

Коэффициент адсорбции магния «MAR»;

Содержание магния в воде считается одним из наиболее важных критериев качества воды для орошения. Как правило, кальций и магний поддерживают равновесие в большинстве водных ресурсов. Увеличение содержания магния в воде отрицательно сказывается на урожайности

сельскохозяйственных культур, поскольку почва становится более засоленной. Значение коэффициента адсорбции магния в водоносном горизонте колеблется от 1,1 % до 7,9 %. Допустимый предел коэффициента адсорбции магния составляет 50 % и рассчитывается по формуле 4. По всем скважинам все расчеты по растворимости сведены в таблице 6.

$$MAR = \frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}} \times 100\%$$

Для скважин № 1 коэффициент адсорбцию магния составляет,

$$= \frac{1.658}{2.320 + 1.658} \times 100\% = 42\%$$

Таблица 6. Классификация качества подземных вод для орошения на основе стандартов SSP, RSBC и M.A.R

Table 6. Classification of groundwater quality for irrigation based on SSP, RSBC and M.A.R standards

Номер скважины Well No	Остаточный бикарбонат натрия «R.S.B.C», мэкв/л		Коэффициент адсорбции магния «M.A.R», %		Примечания (*) Remarks (*) not suitable		
	Процент Растворимого натрия «S.S.P», % Soluble Sodium Percentage (S.S.P), %		Residual Sodium Bicarbonate (R.S.B.C), mEq/L			Magnesium Adsorption Ratio (M.A.R), %	
	Допустимая единица измерения / Allowable unit						
	Мини Min	Макси Max	Мини Min	Макси Max	Мини Min	Макси Max	
	<20	80	<1,25	2,5	7,97	50	
ПКК – 1/ РКК – 1	26%		-1,206		42%	Подходит Suitable	
ПКК – 2/ РКК – 2	27%		-1,453		39%	Подходит Suitable	
ПКК – 3/ РКК – 3	15%		-1,059		*65%	Не подходит Not Suitable	
ПКК – 4/ РКК – 4	21%		-1,944		39%	Подходит Suitable	
ПКК – 5/ РКК – 5	25%		-1,000		44%	Подходит Suitable	
ПКК – 6/ РКК – 6	24%		-0,983		47%	Подходит Suitable	
ПКК – 7/ РКК – 7	31%		-0,478		34%	Подходит Suitable	
ПКК – 8/ РКК – 8	35%		-1,689		25%	Подходит Suitable	
ПКК – 9/ РКК – 9	26%		-3,115		41%	Подходит Suitable	
ПКК – 10/ РКК – 10	27%		-2,904		29%	Подходит Suitable	
ПКК – 11/ РКК – 11	27%		-1,089		49%	Подходит Suitable	

ПКК – 12/ РКК – 12	27%	-3,168	15%	Подходит Suitable
ПКК – 13/ РКК – 13	25%	-3,168	28%	Подходит Suitable
ПКК – 14/ РКК – 14	20%	-2,883	30%	Подходит Suitable
ПКК – 15/ РКК – 15	32%	-2,486	31%	Подходит Suitable
ПКК – 16/ РКК – 16	28%	-4,217	27%	Подходит Suitable
ПКК – 17/ РКК – 17	31%	-1,660	27%	Подходит Suitable

Согласно всесторонней оценке трех ключевых параметров, представленных в таблице 5, подавляющее большинство проб грунтовых вод (16 из 17) пригодны для орошения, поскольку процентное содержание растворимого натрия (SSP) и остаточного бикарбоната натрия (RSBC) находятся в допустимых или превосходных пределах, и единственная неподходящая проба (РПК-3) дисквалифицирован. из-за превышения допустимого предела коэффициента адсорбции магния (MAR), который составляет 65 % при норме до 50 %, что указывает на потенциальный риск засоления почвы для данной конкретной скважины.

Донин Индекс проницаемости «PI»; Высокое содержание натрия в оросительной воде может привести к серьезным проблемам с проницаемостью почвы. На проницаемость почвы влияет длительное использование оросительной воды, например, на рисовых полях. На это влияет содержание натрия, кальция, магния и бикарбоната в почве. Донин разработал критерии оценки пригодности воды для орошения на основе индекса проницаемости «PI», рассчитываемого по формуле 5

$$PI = \frac{Na^+ + \sqrt{HCO_3^-}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+} \times 100\%$$

Для скважин № 1 на основе индекса проницаемости «PI» составляет,

$$= \frac{1.348 + \sqrt{1.115}}{2.320 + 1.658 + 1.348} \times 100\% = 45\%$$

Согласно диаграмме Донины, пробы воды можно разделить на I, II и III классы по порядку. Пробы воды, относящиеся к I и II классам, классифицируются как пригодные для орошения, а вода III класса непригодна. Значения индекса проницаемости водоносного горизонта варьируются от 27,2 % до 84,2 %. Классификация подземных вод для орошения на основе PI [12] показана на рисунке 11.

Согласно классификации Донины, показанной на рисунке 10, большинство образцов подземных вод относятся к классам I и II, что свидетельствует об их хорошей и удовлетворительной пригодности для орошения с точки зрения индекса проницаемости и не создает риска ухудшения физических свойств почвы.

Потенциальная солёность «PS»; Нерастворимая соль выпадает в осадок и накапливается в тех местах почвы, где концентрация соли значительно повышена. Потенциальная минерализация водоносного горизонта

колеблется от 2,78 мэкв/л до 19,466 мэкв/л. Если солёность воды ниже 1,5 мэкв/л, её качество считается отличным для орошения. Однако если показатель превышает 5 мэкв/л, такая вода непригодна для ирригации. Потенциальная солёность «PS» рассчитывался по формуле 6,

$$PS = CL + \frac{1}{2} \times SO_4$$

Для скважин № 1 потенциальная солёность составляет,

$$= 2.538 + \frac{1}{2} \times 1.259 = 3.168 \text{ мэкв/л}$$

Коэффициент Келли «KR»; На основе коэффициента Келли [13] грунтовые воды классифицировались для целей орошения. Коэффициент Келли больше 1 указывал на избыточное содержание натрия в воде, поэтому вода с коэффициентом Келли меньше 1 считалась пригодной для орошения. В данном исследовании значения KR находились в пределах допустимого предела (1,0) и были признаны подходящими для орошения. Значения коэффициента Келли в водоносном горизонте варьировались от 1,356 мг-экв/л до 6,537 мг-экв/л. Коэффициент Келли рассчитывался по формуле (7). Данные расчеты сведены в таблице 7.

$$KR = \frac{Na}{Ca + Mg}$$

Для скважин № 1 Коэффициент Келли составляет,

$$= \frac{1.348}{2.320 + 1.658} = 0.34 \text{ мэкв/л}$$

Анализ данных, приведенных в таблице 6, показывает, что три образца (РПК-3, РПК-9, РПК-17) непригодны для орошения из-за превышения допустимого порога потенциальной минерализации (PS > 5 мэкв/л), в то время как все остальные скважины соответствуют критериям, а значения коэффициента Келли коэффициент (KR) для всех образцов находится в пределах допустимого диапазона (<1), что указывает на низкий риск засоления.

Комплексный анализ подземных вод по ключевым параметрам, их качество для орошения представлен в таблице 8.

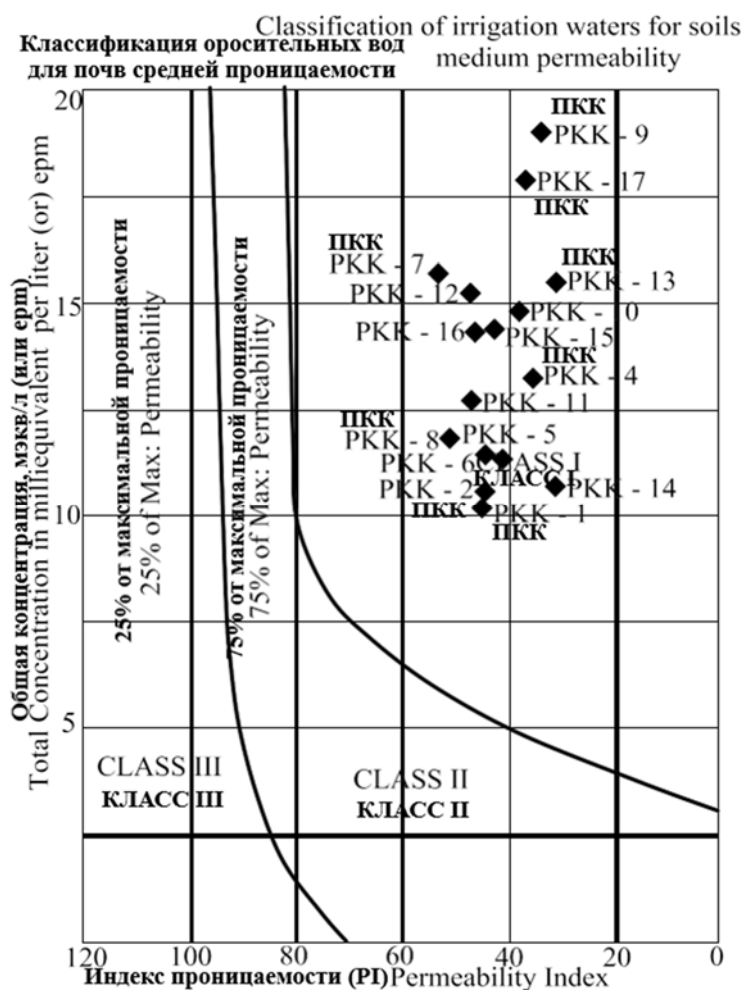


Рисунок 11. Интерпретация результатов анализа оросительной воды по индексу проницаемости «PI» и общей концентрации подземных вод на исследуемой территории

Figure 11. Interpretation of the results of the analysis of irrigation water according to the permeability index "PI" and the total concentration of groundwater in the study area

Таблица 7. Значения потенциальной солёности (PS) и коэффициента Келли (KR) в исследуемом районе
Table 7. The values of potential salinity (PS) and Kelly's ratio (KR) in the study area

Номер скважины Well No	Потенциальная солёность (PS), мэкв/л Potential Salinity (PS), meq/L		Коэффициент Келли (KR) Kelly's Ratio (KR)		Примечания (*) не подходят Remarks (*) not suitable
	Допустимые единицы измерения / Allowable unit				
	Мини Min	Макси Max	Мини Min	Макси Max	
	0.01	5	0.00	1	
ПКК – 1/ ПКК – 1	3,168		0,34		Подходит/Suitable
ПКК – 2/ ПКК – 2	2,872		0,34		Подходит/Suitable
ПКК – 3/ ПКК – 3	*5,100		0,16		Не подходит/Not Suitable
ПКК – 4/ ПКК – 4	3,840		0,26		Подходит/Suitable
ПКК – 5/ ПКК – 5	3,485		0,32		Подходит/Suitable
ПКК – 6/ ПКК – 6	3,289		0,30		Подходит/Suitable
ПКК – 7/ ПКК – 7	3,590		0,43		Подходит/Suitable
ПКК – 8/ ПКК – 8	3,223		0,51		Подходит/Suitable
ПКК – 9/ ПКК – 9	*6,076		0,33		Не подходит/Not Suitable
ПКК – 10/ ПКК – 10	3,967		0,36		Подходит/Suitable
ПКК – 11/ ПКК – 11	3,958		0,35		Подходит/Suitable
ПКК – 12/ ПКК – 12	4,091		0,35		Подходит/Suitable
ПКК – 13/ ПКК – 13	3,624		0,31		Подходит/Suitable
ПКК – 14/ ПКК – 14	2,787		0,24		Подходит/Suitable
ПКК – 15/ ПКК – 15	4,721		0,44		Подходит/Suitable
ПКК – 16/ ПКК – 16	4,077		0,37		Подходит/Suitable
ПКК – 17/ ПКК – 17	*5,531		0,43		Не подходит/Not Suitable

Таблица 8. Сводная таблица по пригодности воды для орошения**Table 8.** Summary table of the suitability of water for irrigation

Номер скважины Well No	«ЕС», мксм/см EC, µS/cm	«SAR», (ммоль/л) ^{0,5} SAR, (mmol/L) ^{0,5}	«S,S,P», % S,S,P, %		«R,S,B,C», мэкв/л RSBC, meq/L		«M,A,R», % M,A,R, %		«PS», мэкв/л PS, meq/l		«KR» KR		Примечания (*) не подходят Remarks (*) not suitable
			Допустимая единица измерения Allowable unit										
			Мини Mini	Макс Maxi	Мини Mini	Макс Maxi	Мини Mini	Макс Maxi	Мини Mini	Макс Maxi	Мини Mini	Макс Maxi	
			<20	80	<1,25	2,5	7,97	50	0,01	5	0,00	1	
ПКК – 1/ РКК – 1	650	1,35	26%		-1,206		42%		3,168		0,34		Подходит Suitable
ПКК – 2/ РКК – 2	665	1,43	27%		-1,453		39%		2,872		0,34		Подходит Suitable
ПКК – 3/ РКК – 3	1100	0,99	15%		-1,059		* 65%		*5,100		0,16		Не подходит Not Suitable
ПКК – 4/ РКК – 4	640	1,20	21%		-1,944		39%		3,840		0,26		Подходит Suitable
ПКК – 5/ РКК – 5	645	1,36	25%		-1,000		44%		3,485		0,32		Подходит Suitable
ПКК – 6/ РКК – 6	640	1,24	24%		-0,983		47%		3,289		0,30		Подходит Suitable
ПКК – 7/ РКК – 7	480	2,00	31%		-0,478		34%		3,590		0,43		Подходит Suitable
ПКК – 8/ РКК – 8	700	2,04	35%		-1,689		25%		3,223		0,51		Подходит Suitable
ПКК – 9/ РКК – 9	980	1,79	26%		-3,115		41%		* 6,076		0,33		Не подходит Not Suitable
ПКК – 10/ РКК – 10	780	1,77	27%		-2,904		29%		3,967		0,36		Подходит Suitable
ПКК – 11/ РКК – 11	650	1,52	27%		-1,089		49%		3,958		0,35		Подходит Suitable
ПКК – 12/ РКК – 12	790	1,75	27%		-3,168		15%		4,091		0,35		Подходит Suitable
ПКК – 13/ РКК – 13	800	1,68	25%		-3,168		28%		3,624		0,31		Подходит Suitable
ПКК – 14/ РКК – 14	500	1,12	20%		-2,883		30%		2,787		0,24		Подходит Suitable
ПКК – 15/ РКК – 15	800	2,02	32%		-2,486		31%		4,721		0,44		Подходит Suitable
ПКК – 16/ РКК – 16	700	1,99	28%		-4,217		27%		4,077		0,37		Подходит Suitable
ПКК – 17/ РКК – 17	1050	1,72	31%		-1,660		27%		* 5,531		0,43		Не подходит Not Suitable

На основании комплексного анализа семи ключевых параметров качества воды для орошения, представленных в таблице 8, можно сделать вывод, что большинство проб (14 из 17) являются пригодными для использования в сельском хозяйстве, так как их показатели соответствуют установленным допустимым пределам, в то время как три скважины (ПКК-3, ПКК-9, ПКК-17) признаны непригодными из-за превышения нормативов по коэффициенту адсорбции магния (MAR) и потенциалу засоления (PS), что указывает на риск засоления почв при их использовании для орошения.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Учитывая геологию, литологию и морфологию исследуемой территории, можно выделить два типа водоносных горизонтов: подземные воды, содержащиеся в аллювиальных отложениях, и подземные воды в пределах формации Иравади [3].

Аллювиальные отложения располагаются в западной части исследуемой территории. Аллювиальный водоносный горизонт представлен преимущественно желтым мелким песком, желтым крупнозернистым песком, а также желтым крупнозернистым песком с включениями гравия. По данным каротажа скважин, уровень грунтовых вод находится на глубине 4–6 метров от поверхности, изменяясь в зависимости от конкретного участка. Мощность водоносного слоя в пределах аллювиальных отложений составляет от 4 до 6 метров. Глубина залегания водоносного горизонта варьируется от 12 до 36 метров. Дебит воды из трубчатого колодца диаметром 3,81 см достигает 3,22 м³/ч.

Песчинки отличаются хорошей сортировкой и округлой формой. Основу породы составляют голубая глина, голубой глинистый песок, желтая глина, голубой глинистый песок с включениями гравия, а также голубой крупнозернистый песок. Согласно результатам

каротажа скважин, уровень грунтовых вод находится на глубине от 8 до 69 метров от поверхности, изменяясь в зависимости от условий залегания. Мощность водоносного горизонта, связанного с формацией Иравади, составляет от 6 до 15 метров, при глубине его залегания от 34 до 106 метров. Дебит воды из скважины диаметром 10 см достигает 15.14 м³/ч. Подземные воды этой формации пригодны как для питьевого водоснабжения, так и для нужд сельского хозяйства.

Рассмотрение классификации вод с использованием диаграмм Пайпера (рисунки 3 и 4) необходимо для визуального определения преобладающих гидрохимических типов подземных вод и процессов, формирующих их состав, что позволяет идентифицировать основные ионы (как в случае с доминирующими типами Ca²⁺-Mg²⁺-Cl⁻ и Ca²⁺-Mg²⁺-HCO₃⁻), для оценки воздействия водоносных пород и выявления смешивания вод из разных источников, обеспечивая тем самым надежную основу для оценки их происхождения, качества и потенциальной пригодности для хозяйственного использования.

Исследование проводилось в городе Пакокке. Общая площадь, охваченная исследованием, составляет приблизительно 482,177 км².

Испытание на откачку было проведено в трубчатой скважине диаметром 20,5 см в Иравадийском водоносном горизонте в течение 4 часов в Университете Пакокке, городок Пакокке. Испытание на откачку показало, что пропускная способность водоносного горизонта составляет 514 м³/сут.

Значения общего содержания растворённых веществ «TDS» в водоносном горизонте варьируются от 310 до 715 ppm. Электропроводность «EC» колеблется в пределах от 480 до 1100 мкмоль/см. Согласно классификации Горрелла «1958», основанной на общем содержании растворённых веществ «TDS», вся вода в районе исследования относится к категории пресной. Преобладающие типы воды по методу Пайпера — это вода типа Ca-Mg-HCO₃, Ca-Mg-Cl-SO₄ и Ca-Mg-SO₄.

Доминирующий тип воды по методу Чадха характеризуется тем, что щелочноземельные металлы «Ca²⁺ и Mg²⁺» преобладают над щелочными металлами «Na⁺ и K⁺», а сильнокислотные анионы «Cl⁻ и SO₄²⁻» преобладают над слабокислотными анионами «HCO₃⁻ и CO₃²⁻». Такая вода обладает постоянной жёсткостью и не образует остаточного натриевого карбоната при использовании в орошении. Положение точек на предлагаемой диаграмме указывает на типы воды Ca²⁺-Mg²⁺-Cl⁻, доминирующий по Ca²⁺-Mg²⁺ с преобладанием Cl⁻, или Cl⁻-доминирующий тип Ca²⁺-Mg²⁺.

В исследуемом районе почти вся вода относится к категории воды с низким содержанием натрия и высокой опасностью засоления. Некоторые трубчатые колодцы относятся к воде с низким содержанием натрия и средней опасностью засоления.

Были проведены дополнительные расчёты, такие как процент растворённого натрия «SSP», коэффициент адсорбции магния «MAR», потенциальная солёность «PS», остаточный натрий бикарбонат «RSBC», коэффициент Келли «KR» и индекс проницаемости «PI». Согласно диаграмме Уилкокса, сравнивающей электропроводность «EC» и «SSP», почти вся вода

относится к типам качества от «превосходного до хорошего» и от «хорошего до допустимого». По результатам расчёта индекса проницаемости «PI», большинство подземных вод в районе исследования попадает в класс I, что указывает на их пригодность для использования в целях орошения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное исследование представляет собой комплексную гидрогеологическую и гидрохимическую оценку подземных вод в районе Пакокке (Центральная Мьянма) с акцентом на их пригодность для орошения. Полученные результаты показывают, что подземные воды преимущественно относятся к типу Ca-Mg-Cl-SO₄, с незначительным распространением фаций Ca-Mg-HCO₃, что отражает влияние процессов выветривания карбонатных и силикатных пород, а также взаимодействия «вода-порода» в пределах аллювиальных водоносных горизонтов и отложений формации Иравади.

Гидрохимический анализ показал, что подземные воды в целом являются пресными или слабоминерализованными, при этом значения удельной электрической проводимости (EC) варьируются от 480 до 1100 мкСм/см. Низкая натриевая опасность подтверждается значениями коэффициента адсорбции натрия (SAR) (0,99–2,04) и показателем SSP (<40 %), тогда как по классификациям Ричардса и Уилкокса большинство проб относится к категориям C2-S1 и C3-S1, что указывает на умеренную минерализацию при низком риске натриевого засоления.

Согласно комплексной оценке с использованием индексов SAR, SSP, RSBC, MAR, PS, KR и PI, около 82 % проб (14 из 17) признаны пригодными для орошения. Однако три пробы (PKK-3, PKK-9 и PKK-17) классифицированы как непригодные вследствие повышенной минерализации и магниевой опасности.

В целом подземные воды исследуемого района характеризуются стабильным химическим составом и представляют собой ценный ресурс для устойчивого развития сельского хозяйства. Тем не менее, для обеспечения долгосрочной продуктивности почв и устойчивости водных ресурсов рекомендуется внедрение эффективных мер управления засолением, обеспечение надлежащего дренажа, а также использование сельскохозяйственных культур, устойчивых к повышенной минерализации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Zaw T., Than M.M. Climate change and groundwater resources in Myanmar // *Journal of Groundwater Science and Engineering*. 2017. V. 5(1). P. 59–66. <https://doi.org/10.26599/JGSE.2017.9280006>
- Chhibber H.L. *The geology of Burma*. London: MacMillan, 1934.
- Cotter G. De P. The geology of parts of the Minbu, Myingyan, Pakokku and lower Chindwin districts // *Memoirs of the Geological Survey of India*. 1938. V. 72(1). 136 p.
- FAO. *Groundwater Management in Myanmar: Challenges and Opportunities*. Rome: Food and Agriculture Organization, 2020.

5. Assessment of Water Resources and Water Demand by User Sectors in Myanmar. New York: United Nations. Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, 1995. V. 75. 54 p.
6. Win K.T., Aung T.T. Sustainable Water Management Practices in Myanmar: A Review // *Journal of Water Resource Management*. 2020. V. 34(8). P. 2221–2235.
7. WHO. *Guidelines for Drinking-water Quality*. 4th ed. Geneva: World Health Organization, 2011.
8. Ravenscroft P., Brammer H., Richards K. *Arsenic Pollution: A Global Synthesis*. Chichester: Wiley-Blackwell, 2009. <https://doi.org/10.1002/9781444308785>
9. Smedley P.L., Kinniburgh D.G. A review of the source, behavior, and distribution of arsenic in natural waters // *Applied Geochemistry*. 2002. V. 17(5). P. 517–568. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5)
10. Doneen L.D. *Notes on Water Quality in Agriculture*. Water Science and Engineering Paper 4001. Davis: Department of Water Sciences and Engineering, University of California, 1964.
11. Kelley W.P. Use of Saline Irrigation Water // *Soil Science*. 1963. V. 95. P. 385–391. <https://doi.org/10.1097/00010694-196306000-00003>
12. Pincetti-Zúniga G.P., et al. Major and trace (including arsenic) groundwater chemistry in central and southern Myanmar // *Applied Geochemistry*. 2020. V. 115. Article id: 104535. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104535>
13. Pavelic P., et al. *Integrated Assessment of Groundwater Use for Improving Livelihoods in the Dry Zone of Myanmar*. IWMI Research Report 164. Colombo: International Water Management Institute, 2015. 53 p.

REFERENCES

1. Zaw T., Than M.M. Climate change and groundwater resources in Myanmar. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2017, vol. 5(1), pp. 59–66. <https://doi.org/10.26599/JGSE.2017.9280006>
2. Chhibber H.L. *The geology of Burma*. London, MacMillan, 1934.

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Людмила В. Боронина, Мин О. Со, Константин В. Белов и Валерий Р. Волошин внесли вклад в разработку концепции статьи, методики и результатов исследования, подготовили текст статьи, окончательно утвердили публикуемую версию статьи. Нухкади И. Рабазанов и Аркадий Ф. Сокольский участвовали в подготовке текста статьи, окончательно утвердили публикуемую версию статьи. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

3. Cotter G. De P. The geology of parts of the Minbu, Myingyan, Pakokku and lower Chindwin districts. *Memoirs of the Geological Survey of India*. 1938, vol. 72(1), 136 p.
4. FAO. *Groundwater Management in Myanmar: Challenges and Opportunities*. Rome, Food and Agriculture Organization, 2020.
5. Assessment of Water Resources and Water Demand by User Sectors in Myanmar. New York: United Nations. Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, 1995, vol. 75, 54 p.
6. Win K.T., Aung T.T. Sustainable Water Management Practices in Myanmar: A Review. *Journal of Water Resource Management*. 2020, vol. 34(8), pp. 2221–2235.
7. WHO. *Guidelines for Drinking-water Quality*. 4th ed. Geneva, World Health Organization, 2011.
8. Ravenscroft P., Brammer H., Richards K. *Arsenic Pollution: A Global Synthesis*. Chichester, Wiley-Blackwell, 2009. <https://doi.org/10.1002/9781444308785>
9. Smedley P.L., Kinniburgh D.G. A review of the source, behavior, and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 2002, vol. 17(5), pp. 517–568. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5)
10. Doneen L.D. *Notes on Water Quality in Agriculture*. Water Science and Engineering Paper 4001. Davis: Department of Water Sciences and Engineering, University of California, 1964.
11. Kelley W.P. Use of Saline Irrigation Water. *Soil Science*, 1963, vol. 95, pp. 385–391. <https://doi.org/10.1097/00010694-196306000-00003>
12. Pincetti-Zúniga G.P., et al. Major and trace (including arsenic) groundwater chemistry in central and southern Myanmar. *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 115, article id: 104535. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104535>
13. Pavelic P., et al. *Integrated Assessment of Groundwater Use for Improving Livelihoods in the Dry Zone of Myanmar*. IWMI Research Report 164. Colombo, International Water Management Institute, 2015, 53 p.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Liudmila V. Boronina, Min O. Soe, Valery R. Voloshin and Konstantin V. Belov contributed to the development of the article's concept, methodology, and research results, prepared the text of the article and finally approved the published version of the article. Nukhkadi I. Rabazanov and Arkady F. Sokolsky participated in the preparation of the article's text and finally approved the published version of the article. All authors equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Мин О. Со / Min O. Soe <https://orcid.org/0009-0000-6252-9880>
 Людмила В. Боронина / Liudmila V. Boronina <https://orcid.org/0000-0002-2442-9050>
 Константин В. Белов / Konstantin V. Belov <https://orcid.org/0009-0009-5105-4627>
 Нухкади И. Рабазанов / Nukhadi I. Rabazanov <https://orcid.org/0009-0001-7664-3852>
 Аркадий Ф. Сокольский / Arkady F. Sokolsky <https://orcid.org/0009-0001-7664-6308>
 Валерий Р. Волошин / Valery R. Voloshin <https://orcid.org/0009-0003-1971-3852>