ЕСТЕСТВЕННЫЕ РЕСУРСЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД РЕСПУБЛИКИ МОЛДОВА

NATURAL GROUNDWATER RESOURCES OF THE REPUBLIC OF MOLDOVA

CZU: 556.3(478) **https://doi.org/10.59295/spd2025e.82**

Константин МОРАРУ
ORCID: 0000-0001-5902-470X
E-mail: cmoraru@yahoo.com
Институт геологии и сейсмологии, Молдавский Государственный Университет, Кишинэу, Республика Молдова

Николай АРНАУТ
ORCID: 0000-0001-5902-470X
E-mail: arnaut@yahoo.com
Институт геологии и сейсмологии, Молдавский Государственный Университет, Кишинэу, Республика Молдова

Елена МАТВЕЕВА
ORCID: 0009-0007-0073-6113
E-mail: elenamatveeva196124@gmail.com
Институт геологии и сейсмологии, Молдавский Государственный Университет, Кишинэу, Республика Молдова

Любовь ВЭТЭМАНУ
ORCID: 0009-0001-1088-3236
E-mail: liubaturcan18@gmail.com
Институт геологии и сейсмологии, Молдавский Государственный Университет, Кишинэу, Республика Молдова

Summary. *The natural groundwater resources on the territory of the Republic of Moldova were studied. For the numerical determination of the resources, 18 independent methods were used, which are applied in different countries and have international recognition. A critical analysis of the results is presented. Cluster analysis and the principal components method allowed to obtain a generalized formula for data averaging. The values of groundwater resources were mapped and their reliability was assessed.*

Keywords: *groundwater, resources, Republic of Moldova.*

ВВЕДЕНИЕ

Ресурсы и запасы подземных вод различные по понятию гидрогеологические определения. Ресурсы – это то количество воды, которое проникает в водоносный горизонт и обеспечивает его существование. Частью ресурсов являются запасы подземных вод, которые могут быть использованя при определенных условиях. В виду особой значимости подземных вод для территории Молдовы, определение их ресурсов указывает на детальную гидрогеологическую изученность данной территории и служит для компетентного планирования регионального и местного использования подземных вод для нужд страны. Также такие данные необходимы при различных научных исследованиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изучаемой территории авторами выполнена оценка естественных ресурсов подземных вод 17-ю самостоятельными методами: 1 – метод местного минимума [1]; 2 – фиксированного интервала [1]; 3 – скользящего интервала [1]; 4 – однопараметрический алгоритм [1]; 5 – двухпараметрический алгоритм [1]; 6 – трехпараметрический алгоритм [1]; 7 – алгоритм Линие и Холлика [1]; 8 – алгоритм Чампмана [1]; 9 – фильтр Фарей и Гупма [1]; 10 – фильтр Ечкхардта [1]; 11 – фильтр EWMA [1]; 12 – метод баланса [2]; 13 – метод PART (SUA) [3]; 14 – метод RORA (SUA) [4]; 15 – метод Воскресеноского [5]; 16 – метод меженных расходов [6]; 17 – метод WTF [7]. Математико-статистические параметры рассчитывались приложениями Excel 2021 и SPSS [8]. Метод главных компонент был применен при помощи программного комплекса SPSS [8], картографические модели составлялись в среде SURFER [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Впервые для территории Молдовы (а также в международном аспекте) естественные ресурсы подземных вод определены с применением комплекса известных в настоящее время 17-ю методами. Анализ обобщенных данных показывает, что величина естественных ресурсов подземных вод изменчива в зависимости от территориальной дифференциации природных условий, а также от метода определения. Установлено, что величина ресурсов подземных вод имеет трендовую тенденцию уменьшения с севера на юг. В этом же направлении уменьшаются ресурсы поверхностных вод, количество атмосферных осадков и увеличиваются значения температуры воздуха, испарения и испаряемости.

Каждый метод имеет свои алгоритмические особенности, поэтому не совсем точное совпадение результатов определения ресурсов подземных вод следует принять как нормальное явление. В связи с существенным разбросом величины ресурсов подземных вод как в пределах каждого метода, так и в пространственном отношении, целесообразно рассматривать статистические характеристики по каждому методу. Такой подход позволяет оценить схожесть или отличие между применяемыми

методами. Расчетные значения ошибок репрезентативности асимметрии и эксцесса составляют $m_A = 0.37$ и $m_E = 0.74$. Анализ параметрической статистики показывает, что данные ресурсов подземных вод близки к нормальному закону (закон Гаусса) распределения. В итоге, такой анализ позволяет отметить: а) средние значения ресурсов подземных вод статистически верны и представительны для исследованных речных бассейнов; б) ряды величин среднего значения ресурсов подземных вод статистически однородны и в) предлагается использовать средние значения для сравнительного анализа методов определения естественных ресурсов подземных вод.

Кластерный и факторный анализы использованы для исследования взаимосвязи результатов определения ресурсов подземных вод применяемыми методами [8, 9].

Кластерный анализ четко выделяет три кластера: 1) методы Lynie, EWMA, PART, Chapman, One, Ihacres, Fixed, Slidind, Two, RORA, Local, Eckhardt, Voskresenski, Mejeni и Furey; 2) метод баланса (I_balanta) и 3) WTF. В первом кластере существуют сильные корреляционные линейные связи. Кластеры 2 и 3 слабо связаны корреляционно с остальными методами.

Первый кластер объединяет методы, основанные на расчленении речного гидрографа, второй – метод баланса воды в речном бассейне и третий – метод, основанный на интерпретации вариаций уровней грунтовых вод. Величины естественных ресурсов подземных вод в пределах выделенных кластеров также различны.

Несмотря на хорошую информативность кластерного анализа в области статистической взаимосвязи исследованных методов, этот способ не позволяет выделить наиболее характерный и репрезентативный метод для исследованной территории. В таком случае, логично найти среднее значение ресурсов подземных вод в первом кластере и принять его как осредненное для каждой гидрологической станции. Полученные данные соответствуют общему региональному тренду изменения естественных ресурсов подземных вод Молдовы. Тем не менее, оценка ресурсов подземных вод по первому кластеру не позволяет оценивать статистический вклад каждого метода в среднее значение и остаются неучтенными данные второго и третьего кластеров. Для такого подхода это существенный недостаток.

Факторный анализ позволяет устранить отмеченные недостатки. Такой анализ [9] выполнен на основе применения метода главных компонент и без вращения факторов. Четко выделяется одна главная компонента – №1, с собственным значением 14.295, составляющая 84.09% от обшей дисперсии и с суммарной дисперсией 84.09%. Остальные компоненты (методы) составляют суммарно 15.01% и незначительно влияют на факторы определявшие главную компоненту.

Исходя их результатов факторного анализа, уравнение расчета естественных ресурсов подземных вод в пределах каждого гидрологического бассейна имеет следующий вид: $R = 0.8409M_1 + 0.06063M_2 + 0.03701M_3 + 0.02356M_4 + 0.01533M_5 + 0.0082M_6 + 0.0038M_7 + 0.0036M_8 + 0.0021M_9 + 0.0015M_{10} + 0.0011M_{11} + 0.0009M_{12} + 0.0007M_{13} + 0.0002M_{14} + 0.0001M_{15} + 0.0001M_{16} + 0.00002M_{17}$, где: $M_{1\text{-}17}$ - значения величины естественных ресурсов, полученные по 17 методам.

В соответствии с этой формулой были рассчитаны региональные естественные ресурсы подземных вод территории Молдовы. Эту формулу можно сократить до M_8 (включительно), т.к. суммарная дисперсия факторов до этого предела составляет 99.298%. Вновь полученные данные также статистически очень близки с величинами первой компоненты или первого метода (метод Local или местного минимума).

Между средним значением ресурсов подземных вод по первому кластеру и ресурсами, рассчитанными по факторному анализу (R) существует статистически сильная линейная корреляционная связь. Это позволяет выделить следующие важные положения: а) региональные ресурсы подземных вод Молдовы соответствуют природным условиям исследуемой территории и статистически являются наиболее вероятностными; б) в случае применения спектра методов определения ресурсов подземных вод для обобщающих значений может быть использован кластерный анализ, а для точных расчетов метод главных компонент факторного анализа.

На рисунке 1 представлена региональная картосхема естественных ресурсов подземных вод.

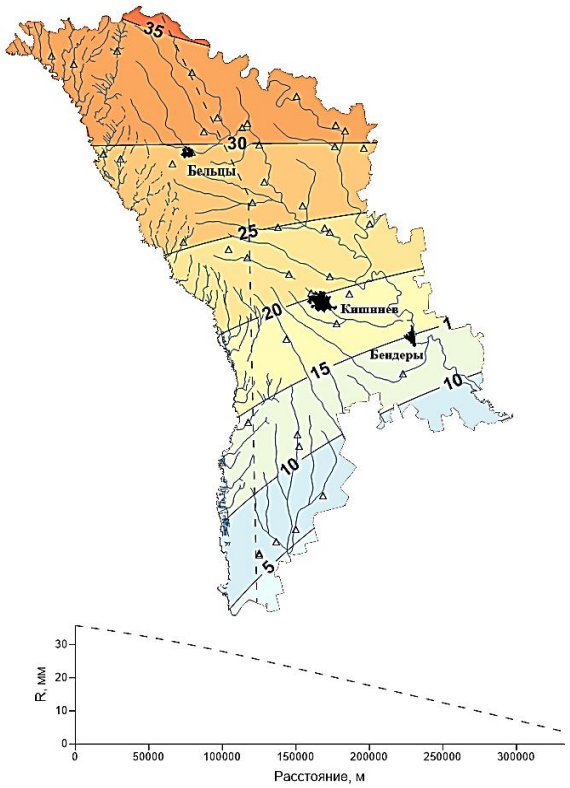


Рис. 1. Картосхема естественных ресурсов подземных вод территории Молдовы (треугольники – местоположение гидрологических станций; изолинии – линии равных значений ресурсов подземных вод, мм; прерывистая линия – линия разреза графика; R – ресурсы подземных вод, мм)

Картосхема построена при помощи программы SURFER [9] с использованием алгоритма полиноминальной регрессии Bi-линейного сглаживания второго порядка. Начальная сетка была задана в виде 174 рядов на 140 столбцов и суммарно состояла из 24360 узловых пересечений.

ВЫВОДЫ

1. Методически, существующие методы оценки естественных ресурсов подземных вод несовершены и не универсальны. Для избежания формирования убеждения об единственном верном конечном результате, целесообразно использовать несколько методов оценки ресурсов подземных вод. При этом выбранные методы должны различаться по алгоритму и исходным данным (например, Балансовый и RORA методы). Сравнение полученных результатов необходимо производить методами геостатистики при условии приведения данных к одинаковой плоскости (или в одинаковых точках).

2. Для исследуемой территории оценка естественных ресурсов выполнена с применением 17-ти самостоятельных методов. По величине арифметического среднего значения (при условии нормального закона распределения) естественных ресурсов подземных вод наименьшие величины характерны для фильтра Фарей и Гумпа (метод BFI) $\bar{æ}$ = 12.34 мм и наибольшее – фильтр скользящего интервала (метод BFI) $\bar{æ}$ = 33.85 мм. Использование кластерного анализа показывает, что на дендрограмме, на уровне расстояний 10 и меньше, выделяются три кластера: 1) методы Lynie, EWMA, PART, Chapman, One, Ihacres, Fixed, Slidind, Two, RORA, Local, Eckhardt, Voskresenski, Mejeni и Furey; 2) метод баланса (I_balanta) и 3) WTF. В первом кластере существуют сильные корреляционные линейные связи. Кластеры 2 и 3 слабо связаны корреляционно с остальными методами.

Несмотря на хорошую информативность кластерного анализа в области статистической взаимосвязи исследованных методов, этот способ не позволяет выделить наиболее характерный и репрезентативный метод для исследованной территории. Факторный анализ, на основе применения метода главных компонент и без вращения факторов, позволяет устранить отмеченные недостатки. Рассчитана совокупная дисперсия для 17-и методов. Исходя их результатов факторного анализа, предложено уравнение расчета естественных ресурсов подземных вод на основе вклада каждого метода в совокупную дисперсию.

3. Региональная оценка естественных ресурсов подземных вод территории Республики Молдова обоснована специальными расчетами и представлена в виде цифровой картографической модели. Метод картирования – полиноминальная регрессия Bi-линейного сглаживания второго порядка. Этот метод выделяет на карте интервальные значения естественных ресурсов в виде слоя стока в мм.

Выявлена зональность в пространственном распределении естественных ресурсов подземных вод. Значения ресурсов уменьшаются с севера, северо-востока

на юг, юго-восток от 35.00 мм 5.0 мм. В этом же направлении увеличиваются значения температуры воздуха и испарения, и уменьшаются значения атмосферных осадков и речного стока.

ЛИТЕРАТУРА:

1. *BFI-Software for baseflow separation from a hydrogram*, 2013. In: <https// hydrooffice.org/>.
2. ЗЕЛЕНИН, И.В. *Естественные ресурсы подземных вод Молдавии*. Кишинев: Штиинца, 1972, 214 с.
3. RORABAUGH, M.I. Estimating changes in bank storage fnd ground-water contribution to streamflow. *Extract of publication,* no. 63 of the I.A.S.H. Symposium Surface Waters, 1964, p. 432-441.
4. RUTLEDJE, A.T. Computer programs for describing the recession of groundwater discharge and for estimating mean groundwater recharge and discharge from streamflow records (update). *Water resources investigation report 98-4148*. USGS, USA, 1998, 52 p.
5. ВОСКРЕСЕНСКИЙ, К.П. Опыт разработки методики прогнозов меженного режима рек Европейской части СССР. *Труды ГГИ*, вып. 10. Л.: Гидрометеоиздат, 1940, с. 21-43.
6. ФИЛИППОВА, И.А. *Минимальный сток рек Европейской территории России и его оценка в условиях ухудшения климата*: автореф. дисс. кандидата географических наук Москва, 2014, 27 с.
7. HEALY, R.W.; COOK, P.G. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, v. 10, №. 1, 2002, p. 91-110.
8. *Statistical Package for the Social Sciences (SPSS 22)*. <www.ibm.com/us-en/ marketplace/spss-statistics> (as 22.11.2017).
9. SURFER, ver. 11.6.1159 (64-bit). https://www.goldensoftware.com/.

Благодарности: *Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Государственной исследовательской программы Республики Молдова, код 010902 Молдавского государственного университета по теме «Комплексные геолого-гидрогеологические и геохимические исследования по разработке подземных хранилищ природного газа в центрально-западной части Республики Молдова (теория, методология и технико-экономическое обоснование), 2024-2027».*