

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ И ОЦЕНКИ ФАКТОРОВ МНОЖЕСТВЕННОГО ВЛИЯНИЯ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЗОН ЗАЛЕГАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Т. Н. Мыслыва, доктор сельскохозяйственных наук

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Беларусь

Аннотация

Впервые для территории Горецкого р-на Могилевской обл. была выполнена идентификация пространственного распределения зон потенциального залегания подземных вод с использованием в качестве исходных данных дистанционного зондирования Земли и открытых баз геопрограммных данных, а также подходов, основанных на применении попарного сравнения пространственных параметров путем присвоения веса на основе экспертных оценок (МАИ) и вычислении пространственных отношений между зависимой переменной и независимыми переменными в соответствии с оценками, которые назначаются на основании главных и второстепенных факторов (ФМВ). В результате обработки исходных данных созданы 7 тематических слоев с соответствующей им атрибутивной информацией, которым присвоены различные весовые коэффициенты, характеризующие силу их влияния на пополнение запасов подземных вод. Идентификация пространственного распределения запасов подземных вод выполнялась методом взвешенного оверлея с использованием функциональных возможностей набора инструментов «Наложение» ArcGIS 10.5. Результаты исследования могут быть использованы как местными органами государственного управления, так и исследователями для разработки мер по оптимизации управления подземными водными ресурсами с целью их охраны и рационального водопотребления.

Ключевые слова: подземные воды, прогнозирование, ГИС, анализ иерархий, факторы.

Abstract

T. N. Myslyva

USING ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS AND MULTI-INFLUENCING FACTORS IN PREDICTING GROUNDWATER POTENTIAL ZONES

For the first time for the territory of the Gorki district of the Mogilev region, the identification of the spatial distribution of groundwater potential zones was carried out using as the initial remote sensing data and open geospatial databases, as well as approaches based on the use of pairwise comparison of spatial parameters by assigning weights based on expert estimates (AHP) and calculating the spatial relationship between the dependent variable and the independent variables in accordance with estimates that are assigned based on the major and minor factors (MIF). As a result of processing the initial data, seven thematic layers with the corresponding attributive information were created, which have been assigned different weights to characterize the strength of their influence on groundwater recharge. The spatial distribution of groundwater potential zones was identified using tool of Weighted Overlay analysis tool of ArcGIS ArcGIS 10.5. The results of the study can be used by both local government bodies and researchers to develop the measures to optimize the groundwater resources management in order to protect them and provide rational utilization.

Keywords: groundwater, forecasting, GIS, analysis of hierarchies, factors.

Введение

Ресурсы подземных вод относятся к возобновляемым природным ресурсам и имеют важное экологическое и экономическое значение, а эффективное управление такими ресурсами – одна из целей устойчивого развития. Республика Беларусь обладает значительными ресурсами пресных подземных вод, многократно превышающими современные и перспективные объе-

мы их потребления: ежегодно в стране осуществляется добыча свыше 800 млн м³ подземных вод [1]. Однако, как и любые другие природные ресурсы, подземные воды могут истощаться и претерпевать изменения качества. В этой связи актуальным становится определение факторов, влияющих на накопление подземных вод, а также установление зон с различным потенциалом запасов пресных подземных вод.

Идентификация потенциальных зон залегания подземных вод и их картографирование могут быть выполнены посредством применения как наземных, так и подземных (геологических и геофизических) методов исследования [2]. Использование данных дистанционного зондирования и функциональных возможностей геоинформационных систем (ГИС) совместно с методами математического анализа, в частности метода анализа иерархий (МАИ) и оценки факторов множественного влияния (ФМВ), открывают новые возможности для гидрогеологических исследований и позволя-

Основная часть

Целью данного исследования стала идентификация и картографирование пространственного распределения зон потенциального залегания подземных вод с использованием в качестве исходных данных дистанционного зондирования Земли и открытых баз геопространственных данных, а также двух относительно простых подходов, основанных на применении попарного сравнения пространственных параметров путем присвоения веса на основе экспертных оценок (МАИ) и вычислении пространственных отношений между зависимой переменной и независимыми переменными в соответствии с оценками, которые назначаются на основании главных и второстепенных факторов (ФМВ).

ют значительно ускорить и удешевить процесс получения необходимой актуальной геопро- странственной информации [3].

Несмотря на важность выполнения точной оценки прогнозных запасов подземных вод на локальном уровне, внимание отечественных ученых сосредоточено преимущественно на особенностях формирования гидрохимического режима подземных вод, тогда как вопросы оценки их пространственного распределения в пределах отдельных административных районов страны являются недостаточно изученными и требуют дальнейшей разработки.

Для достижения цели исследования предусматривалось решение следующих задач: 1) обработка исходных данных и создание тематических слоев с соответствующей им атрибутивной информацией; 2) оценка потенциала наличия подземных вод с использованием МАИ и ФМВ; 3) выполнение анализа чувствительности факторов, влияющих на пополнение ресурсов подземных вод; 4) объединение и преобразование геопро- странственных данных, создание результирующего векторного слоя зон с различным потенциалом наличия подземных вод. Общая схема процесса выполнения идентификации потенциальных зон залегания подземных вод, для дельнеации которых параллельно использовались метод анализа иерархий и оценка факторов множественного влияния, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема выполнения идентификации потенциальных зон залегания подземных вод

Таблица 1. Источники исходных данных

Тип данных	Источник данных	Формат данных
Цифровая модель рельефа	результаты радарной топографической съемки поверхности земного шара (SRTM), 4-я версия (2018 г.), пространственное разрешение 30 м	цифровой
Плотность водосборной сети		растровый
Типы землепользования	идентифицированы из мультиспектральной сцены <i>Landsat-8</i> , пространственное разрешение 30 м	растровый
Тип почвы	база геоданных гармонизированных почв мира (HWSD) ФАО версии 1.2.1	цифровой
Уклон территории	определен по SRTM в среде <i>ArcGIS</i>	растровый
Наличие локальных разломов (линеаментов)	определено по SRTM в среде <i>ArcGIS</i>	растровый
Геоморфологическое строение территории	[4, с. 66]	цифровой
Геологическое строение территории	[4, с. 41]	цифровой

Для построения производных цифровой модели рельефа (далее – ЦМР) и определения плотности водосборной сети (водотоков) использовалась 4-я версия (2018 г.) данных *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) – радарной топографической съемки поверхности земного шара, произведенной в феврале 2000 г. с помощью специальной радарной системы методом радарной интерферометрии с борта американского челнока *Shuttle* [5]. Морфометрический анализ ЦМР выполнялся с использованием функциональных возможностей набора инструментов модуля «Гидрология» *ArcGIS* версии 10.5. Плотность водосборной сети (F_s), шт/км² определялась как частное от деления количества тальвегов каждого порядка (N_{ij}) на общую площадь территории водосбора (A): $F_s = N_{ij}/A$ [6]. Наличие локальных разломов определяли, используя четыре растровых изображения с отмывкой рельефа, полученных из матрицы высот SRTM, с азимутом и высотой, равными 315 и 45; 200 и 50; 100 и 60; 50 и 90. Плотность линеаментов (L_d), шт/км² определялась как частное от деления общей длины идентифицированных локальных разломов (L_i) на общую площадь территории водосбора (A): $L_d = L_i/A$ [3]. Данные о типах землепользования в пределах исследуемой территории были получены из сцены *Landsat-8*: дата съемки – 11 августа 2018 г.; время съемки – 8 час. 53 мин. 34 сек.; облачность в момент съемки – 0,11 %; система координат – WGS-84; проекция – UTM-36U; уровень обработки – 3С – ортотрансформи-

рованное изображение местности, полученное с использованием наземных опорных точек и цифровой модели рельефа; пространственное разрешение – 30 м.

Для получения информации о типах почв, которыми представлена территория Горецкого р-на, были использованы сведения из базы геоданных гармонизированных почв мира (HWSD) ФАО версии 1.2.1, представляющей собой растровую базу данных с разрешением 30 угловых секунд, включающую более 15 000 различных картографических единиц почвы и объединяющую существующие региональные и национальные обновления информации о почве по всему миру с информацией, содержащейся в Цифровой карте мира ФАО-ЮНЕСКО в масштабе 1:5 000 000. Сведения о геологическом и геоморфологическом строении территории получены посредством векторизации картографических изображений на бумажных носителях, представленных в Национальном атласе Беларуси [4].

Путем использования функциональных возможностей ГИС созданы 7 тематических слоев, которые совместно с соответствующей им атрибутивной информацией использовались для прогноза распространения подземных вод: слой геологического строения территории; слой геоморфологического строения территории; слой плотности локальных разломов (линеаментов); слой уклона поверхности; слой типов почв; слой типов землепользования и слой плотности водосборной сети (рис. 2).

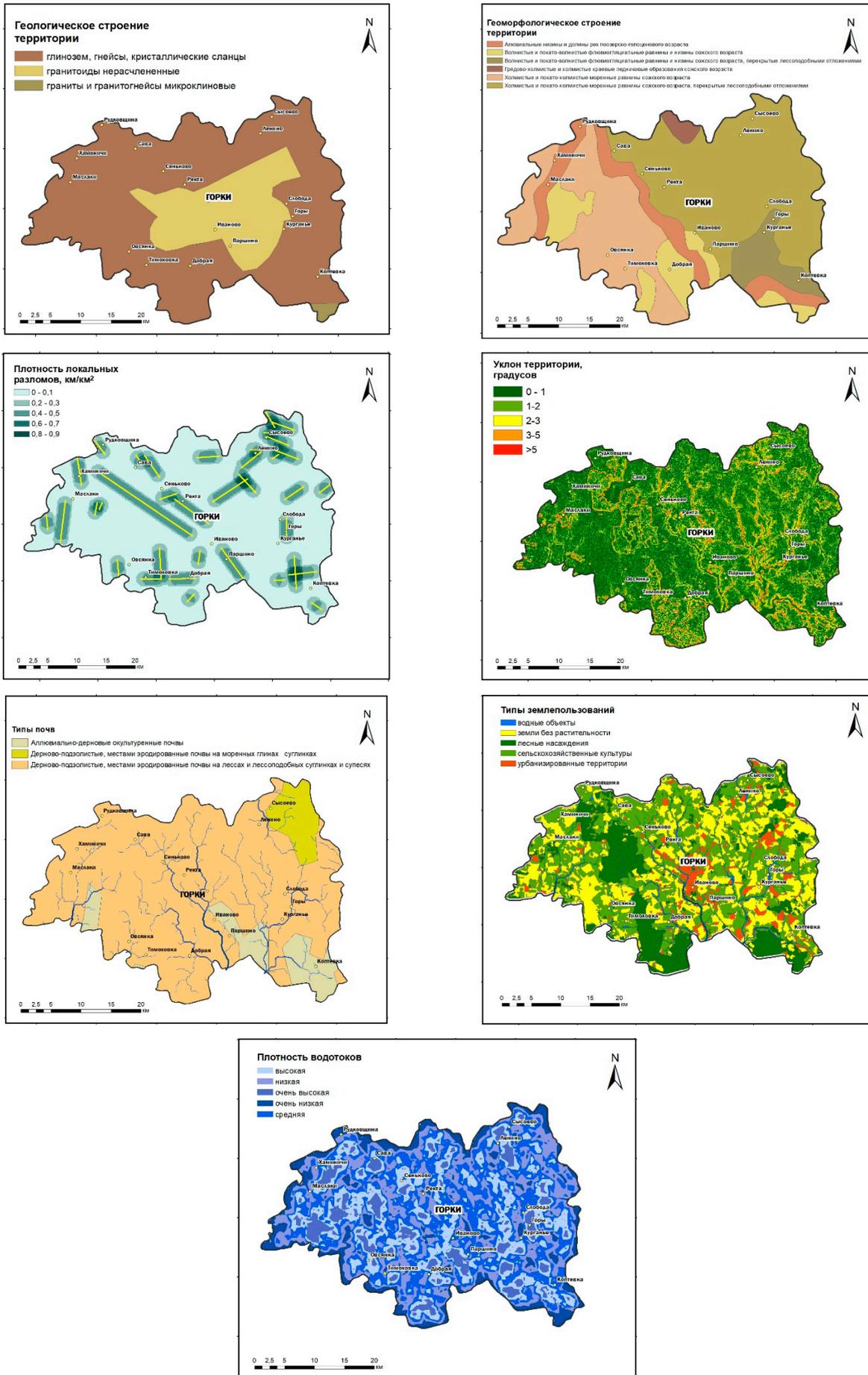


Рис. 2. Тематические слои, использованные для идентификации потенциальных зон залегания подземных вод

Метод анализа иерархий предусматривает рассмотрение проблемы или явления как многоуровневой иерархической структуры, которая учитывает взаимосвязи между ее элементами (факторами) [3, 7]. Каждый элемент иерархии может представлять различные материальные и нематериальные факторы, измеряемые количественные параметры и качественные характеристики, объективные данные и субъективные экспертные оценки [8].

Реализация данного метода при идентификации потенциальных зон залегания подземных вод предусматривала последовательное прохождение следующих этапов: 1) выбор факторов, влияющих на зоны питания подземных вод, и присвоение весов различным тематическим слоям и их соответствующим характеристикам – критериям (построение трехуровневой иерархии «цель – факторы – критерии»); 2) создание матрицы парных сравнений факторов, влияющих на накопление ресурсов подземных вод, ее нормализация и расчет весов каждого фактора; 3) расчет величины относительных суммарных весов факто-

ров, оказывающих воздействие на накопление ресурсов подземных вод, и величины максимального собственного значения вектора согласованности λ_{max} для ранжирования влияния факторов; 4) оценка согласованности матрицы весов факторов влияния посредством определения величины индекса согласованности CI и коэффициента согласованности CR . Данный метод позволяет объединить и преобразовать геопространственные данные (вход) в результирующий векторный слой зон с различным потенциалом наличия подземных вод (выход), посредством преобразования качественной информации отдельных тематических слоев и функций в количественные оценки по шкале Саати [8]. На первом этапе выполнения МАИ каждому фактору, влияющему на накопление ресурсов подземных вод, было присвоено значение от 1 до 7 в зависимости от его воздействия на изучаемый параметр по сравнению с другими факторами при попарных сравнениях. Для описания относительного влияния параметров использовали стандартную шкалу Саати (рис. 3).

Характер влияния	Равное	Слабое	Умеренное	Сильно умеренное	Сильное	Усиленное	Очень сильное	Наиболее сильное	Чрезвычайное
Шкала влияния	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1/9	1/8 1/7	1/6 1/5	1/4 1/3	1/2 1	2 3	4 5	6 7	8 9
	← Менее важное				Более важное →				

Рис. 3. Шкала оценок относительного влияния факторов по Саати [8]

После присвоения веса значимости каждому из учитываемых факторов строилась матрица парных сравнений [9, 10], в которой столбцы расположены в порядке убывания влияния факторов:

$$A = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & & X_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n1} & X_{n2} & & X_{nn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где A – матрица попарных сравнений, в которой элемент X_{lp} обозначает относительную значимость одного параметра по сравнению с другим параметром.

Первый элемент матрицы получает 1 балл по сравнению с самим собой, а остальные элементы строк заполняются с использованием фактических оценок шкалы Саати, когда более важный параметр сравнивается с менее важным параметром, и обратных величин оценки Саати, когда менее важный параметр сравнивается с более важным (табл. 2).

Геологическое и морфологическое строение территории, а также плотность локальных разломов были определены в качестве факторов, имеющих максимальный вес влияния, тогда как плотность водосборной сети была определена в качестве фактора, наименее влияющего на распределение и пополнение запасов подземных вод. Данное предположение подтверждается и в исследованиях [2, 9, 11].

Чтобы вычислить вес каждого фактора, необходимо построить нормализованную матрицу попарных сравнений. Для этого каждое значение столбца из матрицы парных сравнений следует разделить на его сумму. Вес фактора при этом определяется как среднее арифметическое из значений каждой строки нормализованной матрицы (табл. 3).

Для определения величин относительных весов факторов строилась матрица относительных весов (табл. 4).

Таблица 2. Матрица парных сравнений факторов, влияющих на накопление ресурсов подземных вод

Фактор и его обозначение	ГЕ	ГМ	ПР	УТ	ТП	ТЗ	ПВ
Геологическое строение территории (ГЕ)	1	2	3	4	5	6	7
Геоморфологическое строение территории (ГМ)	1/2	1	2	3	4	5	6
Плотность разломов (ПР)	1/3	1/2	1	2	3	4	5
Уклон территории (УТ)	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4
Тип почвы (ТП)	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3
Тип землепользования (ТЗ)	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2
Плотность водосборной сети (ПВ)	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1
Сумма	2,59	4,45	7,28	11,08	15,83	21,5	28,0

Таблица 3. Нормализованная матрица весов факторов, влияющих на накопление ресурсов подземных вод

Фактор и его обозначение	ГЕ	ГМ	ПР	УТ	ТП	ТЗ	ПВ	Вес фактора, W_i
Геологическое строение территории (ГЕ)	0,386	0,449	0,412	0,361	0,316	0,279	0,250	0,351
Геоморфологическое строение территории (ГМ)	0,193	0,225	0,275	0,271	0,253	0,233	0,214	0,238
Плотность разломов (ПР)	0,127	0,112	0,137	0,181	0,190	0,186	0,179	0,159
Уклон территории (УТ)	0,097	0,074	0,069	0,090	0,126	0,140	0,143	0,105
Тип почвы (ТП)	0,077	0,056	0,045	0,045	0,063	0,093	0,107	0,070
Тип землепользования (ТЗ)	0,066	0,045	0,034	0,030	0,032	0,047	0,071	0,046
Плотность водосборной сети (ПВ)	0,054	0,038	0,027	0,023	0,021	0,023	0,036	0,032
Сумма эффектов	1	1	1	1	1	1	1	1

Таблица 4. Расчет величины относительных весов факторов, влияющих на накопление ресурсов подземных вод

Фактор и его обозначение	ГЕ	ГМ	ПР	УТ	ТП	ТЗ	ПВ	Относительный вес фактора, W_i
Геологическое строение территории (ГЕ)	0,351	0,476	0,477	0,420	0,350	0,276	0,224	2,574
Геоморфологическое строение территории (ГМ)	0,176	0,238	0,318	0,315	0,280	0,230	0,192	1,749
Плотность разломов (ПР)	0,116	0,119	0,159	0,210	0,210	0,184	0,160	1,158
Уклон территории (УТ)	0,088	0,079	0,080	0,105	0,140	0,138	0,128	0,757
Тип почвы (ТП)	0,070	0,060	0,052	0,053	0,070	0,092	0,096	0,493
Тип землепользования (ТЗ)	0,060	0,048	0,040	0,035	0,035	0,046	0,064	0,327
Плотность водосборной сети (ПВ)	0,049	0,040	0,032	0,026	0,023	0,023	0,032	0,226

Для получения ее значения из каждого столбца ненормализованной матрицы попарных сравнений умножались на значение веса соответствующего фактора W (см. табл. 3), а относительный вес каждого фактора W_i рассчитывался как сумма весов фактора в каждой строке матрицы.

Для подтверждения либо опровержения правильности суждений о влиянии того либо

иного из изучаемых факторов на накопление ресурсов подземных вод в пределах территории интереса была выполнена оценка согласованности матрицы весов факторов влияния. На первом этапе оценки выполнялось определение величины собственного значения вектора согласованности λ_{\max} как частного от деления общего относительного веса каждого фактора W_i на вес соответствующего фактора W (табл. 5).

Таблица 5. Расчет величины собственного значения вектора согласованности λ_{\max}

Фактор и его обозначение	Относительный вес фактора, W_i	Вес фактора, W	Собственное значение вектора согласованности фактора, λ_{\max}
Геологическое строение территории (ГЕ)	2,574	0,351	7,33
Геоморфологическое строение территории (ГМ)	1,749	0,238	7,35
Плотность разломов (ПР)	1,158	0,159	7,28
Уклон территории (УТ)	0,757	0,105	7,21
Тип почвы (ТП)	0,493	0,070	7,04
Тип землепользования (ТЗ)	0,327	0,046	7,10
Плотность водосборной сети (ПВ)	0,226	0,032	7,05
Среднее значение вектора согласованности, λ_{\max}	7,19		

Согласно [8], для подтверждения согласованности матрицы парных сравнений она должна иметь среднее собственное значение λ_{\max} , большее или равное количеству рассматриваемых факторов n . По результатам выполненных расчетов получено главное собственное значение 7,19 для матрицы из 7 факторов, следовательно, условие $\lambda_{\max} \geq n$ выполнено, а матрица парных сравнений является согласованной.

Чтобы оценить общую несогласованность созданной иерархической модели, обуслов-

ленную накоплением погрешностей, связанных с несогласованностью локальных суждений, выполнялся расчет индекса согласованности CI , который определялся по формуле (2), и коэффициента согласованности CR , вычисляемого по формуле (3):

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1), \quad (2)$$

$$CR = CI / RI, \quad (3)$$

где RI – среднее значение индекса однородности случайным образом составленной матрицы парных сравнений, которое основано на экспериментальных данных (табл. 6).

Таблица 6. Референтные значения индексов случайной несогласованности [8]

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Иерархия считается согласованной, если значение CR не превышает уровня 0,1 [7]. В данном исследовании для матрицы из семи переменных RI равен 1,32, а коэффициент согласованности $CR = 0,0239$, что свидетельствует о том, что веса, присвоенные факторам, влияющим на накопление ресурсов подземных вод,

являются согласованными, а иерархическая модель – правильной, детально структурированной и пригодной для выполнения прогноза.

Метод оценки факторов множественного влияния основан на определении пространственных отношений между зависимой переменной и независимыми переменными в соот-

ветствии с оценками, которые назначаются на основании влияния главных и второстепенных факторов. Распределение факторов влияния на главные и второстепенные и их ранжирование выполнено на основании и собственного опыта автора, и данных обзора литературных источников [3, 12, 13]. Факторам, оказываю-

щим значительное влияние на изучаемый параметр (в данном случае потенциал наличия подземных вод), присваивался вес, равный 1,0, факторам, имеющим второстепенное влияние – вес 0,5, а факторам, не оказывающим влияния, – вес 0 (табл. 7).

Таблица 7. Значения основных, второстепенных, совместных эффектов и предполагаемых весов факторов, влияющих на пополнение ресурсов подземных вод

Фактор и его обозначение	Главный эффект, M_3	Второстепенный эффект, V_3	Совместный эффект, S_3	Вес влияющего фактора, W_{M_3}
Геологическое строение территории (ГЕ)	4	1	5	28
Геоморфологическое строение территории (ГМ)	3	0,5	3,5	19
Плотность разломов (ПР)	2	0,5	2,5	14
Уклон территории (УТ)	2	0,5	2,5	14
Тип почвы (ТП)	2	0	2	11
Тип землепользования (ТЗ)	1	0,5	1,5	8
Плотность водосборной сети (ПВ)	1	0	1	6
Всего	15	3	18	100

Совместный эффект влияния при этом определялся как кумулятивная сумма главного и второстепенного эффектов, а вес каждого влияющего фактора устанавливался с использованием следующей формулы [13]:

$$S_3 = ((M_3 + V_3) / \sum(M_3 + V_3)) \times 100 \quad (4)$$

На рис. 4 проиллюстрирована сила взаимосвязей, присутствующих между множеством факторов, непосредственно влияющих на пополнение ресурсов подземных вод.

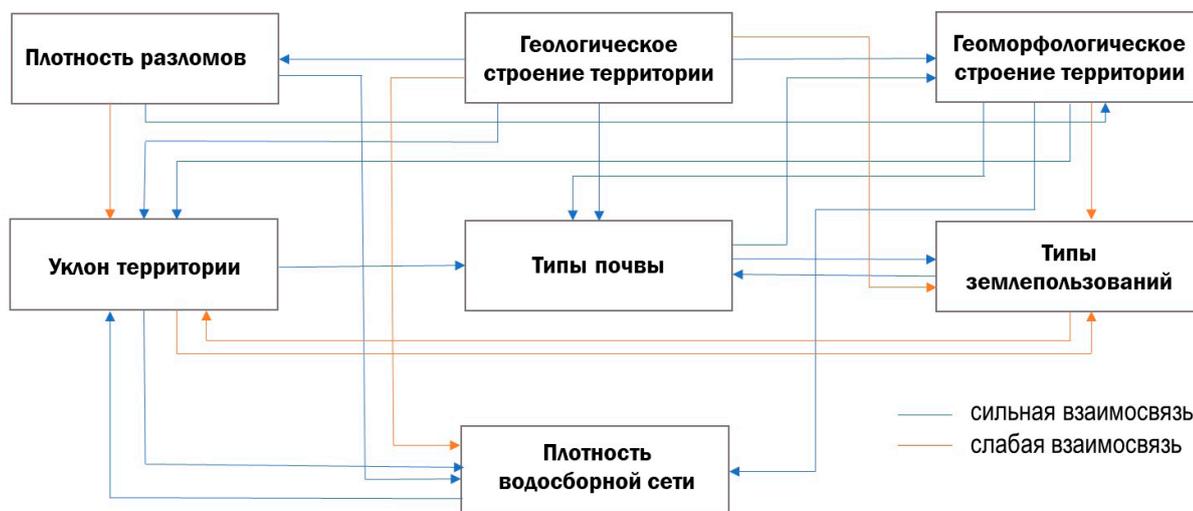


Рис. 4. Взаимосвязь между множеством факторов, влияющих на пополнение ресурсов подземных вод

Идентификация пространственного распределения запасов подземных вод выполнялась методом взвешенного оверлея с использованием функциональных возможностей набора инструментов «Наложение» ArcGIS 10.5 на основе 7 тематических слоев и их соответствующего процентного влияния [14]. Значения пикселей полученных растровых слоев переклассифицировались в общую шкалу оценки потенциала наличия подземных вод: 1 (очень высокий); 2 (высокий); 3 (умеренный) – посредством умножения значений ячеек раstra каждого класса факторов на вес фактора и суммирования полученных значений для создания карты потенциального наличия подземных вод [3, 15]:

$$GWRZ = \sum_{i=1}^n W_i * R_i = (GE_R GE_W + GM_R GM_W + PR_R PR_W + UT_R UT_W + TP_R TP_W + TZ_R TZ_W + PB_R PB_W), \quad (5)$$

где $GWRZ$ – зона с соответствующим потенциалом наличия подземных вод; W_i – вес каждого фактора (тематического слоя); R_i – ранг каждого класса каждого фактора (тематического слоя); индексы R и W относятся, соответственно, к весу фактора (тематического слоя) и рангу класса фактора. Выбор трехступенчатой шкалы оценки был продиктован тем, что территория выполнения исследований не относится ни к аридной, ни к семиаридной зоне.

В табл. 8 представлены окончательные веса факторов, влияющих на пополнение ресурсов подземных вод. Максимальный вес имеет фактор геологического строения территории, определяющий пористость и проницаемость водоносных пород, которые, в свою очередь, влияют на возникновение и распределение подпитки подземных вод. В геологическом отношении территория Горьковского р-на относится к Могилевской мульде проседания Оршанской впадины. Для нее характерно глубокое залегание фундамента – 1250–1400 метров. Литология района исследований представлена глиноземами, гнейсами и кристаллическими сланцами (77 % площади поверхности; 988,38 км²), гранитоидами нерасчлененными (22,3 %; 286,34 км²), гранитами и гранито-гнейсами микроклиновыми (0,7 %; 9,58 км²) с рейтингами, меняющимися от 1 до 3. Зона с умеренным потенциалом подземных вод приурочена к территории с распространением

нерасчлененных гранитоидов, находящейся в центральной части Горьковского р-на. Глубина залегания первого от поверхности водоносного горизонта колеблется от 0,5 до 9 м.

Горьковский район расположен преимущественно в пределах территории Оршанско-Могилевского плато, за исключением северо-восточной части, представленной Горьково-Мстиславской возвышенностью. Преобладающий характер рельефа – волнистая платообразная равнина, сильно расчлененная долинами р. Прони с притоками Поросица, Быстрая, Вербовка и Гальша, р. Баси с притоками Полна, Голубица, Ремествянка, Лебедевка, Днепрец и Мерея, также густой сетью глубоких оврагов и балок с выступающими в ряде мест моренными грядами в виде пологих холмов. Рельеф равнины слагают маломощные рыхлые лессовидные суглинки и супеси. Лессы покрывают водоразделы и склоны повышенных частей территории, лишенной лесной растительности.

Геоморфологические особенности исследуемого региона были разделены на 6 категорий, веса которых меняются от 1 до 6. Максимальным потенциалом наличия подземных вод характеризуются алювиальные низины и долины рек поозерско-голоценового возраста, занимающие 11,1 % (142,41 км²) территории, волнистые и покато-волнистые флювиогляциальные равнины и низины сожского возраста, занимающие 10,9 % (141,12 км²) территории.

Сеть локальных разломов способствует увеличению пористости пород и играет важную роль в движении грунтовых вод и увеличении потенциала их подпитки. Плотность разломов, полученная из ЦМР, созданной по данным матрицы высот SRTM, – индикатор степени трещиноватости подстилающих пород. Высокая плотность линейных элементов всегда указывает на очень высокий потенциал пополнения подземных вод, однако ее низкая частота не обязательно означает очень низкий потенциал перезарядки [3]. В представляемом исследовании линейная плотность была разделена на пять классов с варьированием рейтингов от 1 до 5. В пределах исследуемой территории преобладают линейные элементы с плотностью от 0,0 до 0,1 км/км² (65,06 %; 826,05 км²), относящиеся к категории «очень низкая». Территория

с высокой (0,6–0,7 км/км²) и очень высокой (0,8–0,9 км/км²) плотностью линейных элементов занимает площадь 153,25 км² (11,93 %) и 27,30 км² (2,13 %) соответственно. Преобладающее направление распространения локальных разломов – северо-запад – юго-восток.

Уклон является характеристикой локального и регионального рельефа, влияющей на удержание воды, интенсивность инфильтрации, подпитку водоносного горизонта и движение грунтовых вод. Район исследования был редуцирован на 5 классов уклонов, а именно: очень низкий уклон (0–1°), низкий (0–2°), умеренный (2–3°), высокий (3–5°) и очень высокий (> 5°). В его пределах преобладают территории с очень низким (485,16 км²; 37,78 %) и низким (408,02 км²; 31,77 %) уклонами и высоким потенциалом для подпитки подземных вод. По результатам морфометрического анализа ЦМР было установлено, что площадь эрозионно-опасных земель с крутизной склона выше 3° и невысоким потенциалом подпитки в пределах территории Горьковского р-на составляет более 15 % от его общей площади.

Гранулометрический состав почвы определяет ее инфильтрационную способность и непосредственно влияет на скорость просачивания поверхностных вод в водоносные горизонты и пополнение запасов подземных вод. Согласно почвенно-географическому районированию Республики Беларусь территория Горьковского р-на расположена в Северной (Прибалтийской) почвенной провинции.

Почвенный покров района представлен преимущественно дерново-подзолистыми, местами эродированными почвами, сформировавшимися на лессах и лессовидных суглинках и супесях, а также на моренных глинах и суглинках; в долинах рек распространены аллювиально-дерновые окультуренные почвы. Преимущественная часть территории, на которой проводились исследования, представлена почвами супесчаного гранулометрического состава (1082,76 км²; 84,31 %). Она характеризуется высокой инфильтрационной способностью, а почвы с низкой инфильтрационной способностью сосредоточены в пределах северо-восточной части района и занимают около 6 % территории (76,89 км²).

Землепользование также оказывает определенное влияние на формирование и распределение стока с поверхности. Территории, занятые водоемами, и лесопокрытые площади имеют максимальную способность к накоплению поверхностного стока и пополнению запасов подземных вод, а ранг их веса составляет 5 и 4 соответственно. Довольно высокой инфильтрационной способностью обладают и сельскохозяйственные земли, тогда как территории, находящиеся под застройкой, дорогами и иными объектами инфраструктуры имеют низкую инфильтрационную способность из-за потери проницаемости поверхности. По результатам классификации сцены, полученной с платформы *Landsat-8*, установлено, что большая часть исследуемой территории занята сельскохозяйственными землями (73,0 %; 937,58 км²); второе место по площади занимают лесопокрытые территории (18,88 %; 242,47 км²); сельские и городские поселения занимают 7,11 % (91,37 км²); водные объекты – около 1 % территории (12,89 км²).

Плотность водосборной сети – еще один фактор, влияющий на движение воды и пополнение запасов подземных вод. Участки с высокой плотностью дренажа имеют меньшее влияние на изучаемый параметр, нежели участки с высокой его плотностью. По результатам выполнения комплексного морфометрического анализа в пределах исследуемой территории выделено 5 категорий плотности водосборной сети, ранжированных в возрастающем порядке: очень высокая (9,45 %; 121,39 км²), высокая (22,36 %; 287,19 км²), средняя (31,31 %; 402,18 км²), низкая (25,13 %; 322,72 км²) и очень низкая (11,74 %; 150,83 км²).

Для проверки правильности теоретического предположения о влиянии того либо иного фактора на формирование ресурсов подземных вод был выполнен анализ динамики индекса чувствительности S при удалении одного или нескольких тематических слоев (факторов) из полученного методом взвешенного оверлея растрового изображения [16]:

$$S = 100 (V/N - V'/n) / V, \quad (6)$$

где V и V' – невозмущенный и возмущенный индексы уязвимости соответственно; N и n – количество уровней данных (тематических слоев), используемых для вычисления V и V' .

Таблица 8. Ранги и веса, присвоенные критериям факторов по результатам применения МАИ и ФМВ

Фактор и его обозначение	Критерий фактора	Ранг класса	Метод анализа иерархий (МАИ)			Оценка факторов множественного влияния (ФМВ)		
			вес фактора	вес критерия	общий вес	вес фактора	вес критерия	общий вес
Геологическое строение территории (ГЭС)	Глинозем, гнейсы, кристаллические сланцы	3		1,05			0,84	
	Гранитоиды нерасчлененные	1	0,35	0,35	2,10	0,28	0,28	1,68
	Граниты и гранитоиды микроклиновые	2		0,70			0,56	
Геоморфологическое строение территории (ГМС)	Холмистые и покато-холмистые моренные равнины сожского возраста	3		0,72			0,57	
	Аллювиальные низины и долины рек поозерско-голоценового возраста	6		1,44			1,14	
	Волнистые и покато-волнистые флювиогляциальные равнины и низины сожского возраста	5		1,20			0,95	
	Волнистые и покато-волнистые флювиогляциальные равнины и низины сожского возраста, перекрытые лессовидными отложениями	4	0,24	0,96	5,04	0,19	0,76	3,99
	Грядово-холмистые и холмистые краевые ледниковые образования сожского возраста	1		0,24			0,19	
	Холмистые и покато-холмистые моренные равнины сожского возраста, перекрытые лессовидными отложениями	2		0,48			0,38	
Плотность разломов (ПР)	Очень высокая	5		0,80			0,70	
	Высокая	4		0,64			0,56	
	Средняя	3	0,16	0,48	2,40	0,14	0,42	2,10
	Низкая	2		0,32			0,28	
	Очень низкая	1		0,16			0,14	

Окончание табл. 8

Уклон территории (УТ)	0-1	5	0,11	1,65	0,14	0,55	0,70	2,10
	1-2	4					0,56	
	2-3	3					0,42	
	3-5	2					0,28	
	Более 5	1					0,14	
Тип почвы (ТП)	Аллювиально-дерновая окультуренная	3	0,07	0,42	0,11	0,21	0,33	0,66
	Дерново-подзолистая, местами эродированная на лессах и лессовидных суглинках и супесях	2					0,22	
	Дерново-подзолистая, местами эродированная на моренных глинах и суглинках	1					0,11	
	Водные объекты	5					0,40	
	Урбанизированные территории	1					0,08	
Тип землепользования (ТЗ)	Лесные насаждения	4	0,05	0,75	0,08	0,20	0,32	1,20
	Земли без растительности	2					0,16	
	Сельскохозяйственные культуры	3					0,24	
	Очень высокая	1					0,06	
	Высокая	2					0,12	
Плотность водосборной сети (ПВ)	Средняя	3	0,03	0,45	0,06	0,09	0,18	0,90
	Низкая	4					0,24	
	Очень низкая	5					0,30	
	Очень высокая	1					0,03	
	Высокая	2					0,06	

Установлено, что наименьшая вариация индекса чувствительности, независимо от метода оценки, связана с одновременным удалением

таких факторов, как плотность водосборной сети, типы землепользования и почвы (табл. 9).

Таблица 9. Результаты выполнения анализа чувствительности удаления факторов, влияющих на пополнение ресурсов подземных вод

Фактор, который учитывался	Среднее значение индекса чувствительности факторов		Стандартное отклонение		Коэффициент вариации	
	МАИ	ФМВ	МАИ	ФМВ	МАИ	ФМВ
ПВ	1,76	1,21	0,44	0,62	25,0	51,2
ПВ + ТЗ	3,97	2,71	0,75	1,02	18,9	37,6
ПВ + ТЗ + ТП	7,20	4,89	1,28	1,63	17,8	33,3
ПВ + ТЗ + ТП + УТ	4,42	5,69	3,13	2,93	29,9	51,5
ПВ + ТЗ + ТП + УТ + ПР	15,67	10,09	5,38	5,04	34,3	50,0
ПВ + ТЗ + ТП + УТ + ПР + ГМ	19,39	13,79	10,84	8,21	55,9	59,5

Довольно низкие значения данного показателя установлены и при удалении таких факторов, как плотность водосборной сети и тип землепользования, что свидетельствует о правильности сделанных предположений об их низком влиянии на изучаемый параметр – прогнозные запасы подземных вод. По результатам анализа можно констатировать, что при ранжировании параметров наиболее низкий ранг следует присвоить не фактору плотности водосборной сети, а типу почвы, поскольку удаление данного фактора из прогнозной модели вызывает наименьшую вариацию индекса чувствительности. Тем не менее проверка гипотезы о минимальном влиянии на пополнение ресурсов подземных вод плотности водосборной сети, типа землепользования и типа почвы в целом подтвердила правильность данного предположения.

Поскольку числовые значения рангов, присвоенные каждому классу каждого фактора, являются, по существу, произвольными, выполнен анализ индекса чувствительности по одному параметру. Такой анализ позволяет сравнить реальный, или «эффективный», и «теоретический» вес каждого фактора и сделать вывод о правильности выдвинутых предположений. Реальный или «эффективный» вес каждого фактора рассчитывается следующим образом [17]:

$$W = 100 * P_r * P_w / V, \quad (7)$$

где P_r и P_w – значение рейтинга и веса для каждого фактора; V – невозмущенный индекс уязвимости.

Результаты выполненного анализа свидетельствуют, что для всех факторов, независимо

от метода, используемого для оценки их влияния, величина «эффективного» веса превышает вес «теоретический» (табл. 10). Однако при этом сохраняется общая тенденция ранжирования факторов, оказывающих сильное и слабое влияние на изучаемый параметр. Исключение составили только факторы, связанные с уклоном поверхности и плотностью разломов, для которых средние значения «эффективных» весов составили 31,03 и 35,76 (МАИ) и 27,15 и 45,51 (ФМВ) соответственно, тогда как по величине «теоретические» весов приоритет принадлежит фактору плотности разломов перед фактором уклона поверхности (МАИ) либо их влияние определяется как равное (ФМВ).

Важно отметить, что, если при анализе чувствительности будут обнаружены значительные расхождения в распределении «эффективных» и «теоретических» весов влияния факторов, необходимо внести соответствующие корректировки и выполнить повторное взвешивание оверлея.

После идентификации зон с различным потенциалом наличия грунтовых вод (на основе оценок и весов 7 тематических слоев) были созданы геоинформационные модели (8) и (9), результаты визуализации которых представлены на рис. 5.

Для метода МАИ:

$$GWRZ = 0,35ГЕ + 0,24ГМ + 0,16ПР + 0,11УТ + 0,07ТП + 0,05ТЗ + 0,03ПВ; \quad (8)$$

для метода ФМВ:

$$GWRZ = 0,28ГЕ + 0,19ГМ + 0,14ПР + 0,14УТ + 0,01ТП + 0,08ТЗ + 0,06ПВ. \quad (9)$$

Таблица 10. Результаты выполнения анализа индекса чувствительности по одному параметру

Неучитываемый фактор	Рассчитанные эффективные веса								Присвоенные теоретические веса	
	минимальное значение		максимальное значение		среднее значение		стандартное отклонение			
	МАИ	ФМВ	МАИ	ФМВ	МАИ	ФМВ	МАИ	ФМВ	МАИ	ФМВ
Геологическое строение территории (ГЕС)	35	28	105	84	84,92	67,94	34,26	27,41	35	28
Геоморфологическое строение территории (ГМС)	48	38	144	114	72,97	57,77	39,73	31,45	24	19
Плотность разломов (ПР)	16	14	80	70	31,03	27,15	19,55	17,10	16	14
Уклон территории (УТ)	11	14	55	70	35,76	45,51	15,39	19,59	11	14
Тип почвы (ТП)	7	11	21	33	12,92	20,31	5,34	8,38	7	11
Тип землепользования (ТЗ)	5	8	25	40	12,30	19,68	5,35	8,56	5	8
Плотность водосборной сети (ПВ)	3	6	15	30	9,17	18,33	3,89	7,97	3	6

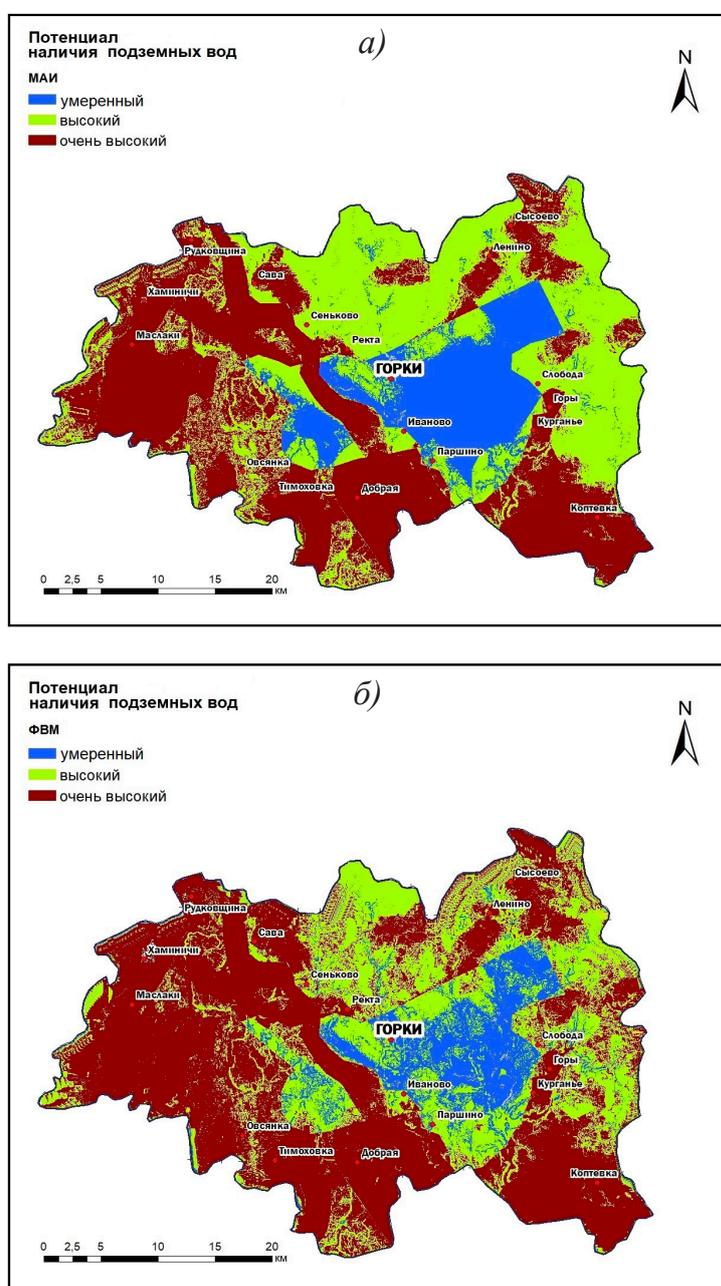


Рис. 5. Зоны с различным потенциалом наличия подземных вод, определенные в пределах Горецкого р-на с использованием метода анализа иерархий (а) и оценки факторов множественного влияния (б)

Независимо от используемого метода идентификации, территории с максимальным потенциалом наличия подземных вод идентифицированы в южной и западной части Горецкого р-на; минимальным потенциалом характеризуется его северо-восточная часть. Следует отметить, что в гидрогеологическом отношении данная территория принадлежит к Оршанскому гидрогеологическому бассейну, а его водоносные комплексы в пределах района приурочены к карбонатным толщам верхнего девона и мела и находятся в зоне застойного водного режима, что является причиной высокой минерализации подземных вод, достигающей 50–100 г/л и более. Основной водоносный горизонт, который может использоваться для водоснабжения, – франский водоносный комплекс, водовмещающие породы которого представлены мергелями, глинами известковистыми, доломитами, песками, песчаниками, доломитизированными известняками.

По информации РУП «Белорусский государственный геологический центр» Департамента по геологии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, на территории Горецкого р-на на водозаборе «Ректа» разведаны и утверж-

дены эксплуатационные запасы пресных подземных вод, применяемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Горки. Кроме того, на территории района функционируют 65 артезианских скважин, вода из которых используется как для производственных целей, так и для хозяйственно-бытового водопотребления. Артезианские скважины, обеспечивающие питьевой водой население г. Горки и района, расположены в населенных пунктах Горы, Добрая, Каменка, Коптевка, Ленино, Маслаки, Матюты, Овсянка, Паршино, Ректа, Рудковщина, Сава, Ходоровка, Чепелинка, Горки, Котелево. На полученных растровых изображениях места расположения участков с очень высоким потенциалом наличия подземных вод полностью соотносятся с месторасположением данных населенных пунктов.

По результатам применения МАИ и геоинформационного анализа, 45,3 % территории Горецкого р-на были отнесены к территориям с очень высоким потенциалом наличия подземных вод; 36,8 % – к территориям с высоким потенциалом; 13,6 % – к территориям с низким потенциалом. Для ФМВ данное соотношение составило 55,4 %, 30,9 % и 13,7 % (рис. 6).

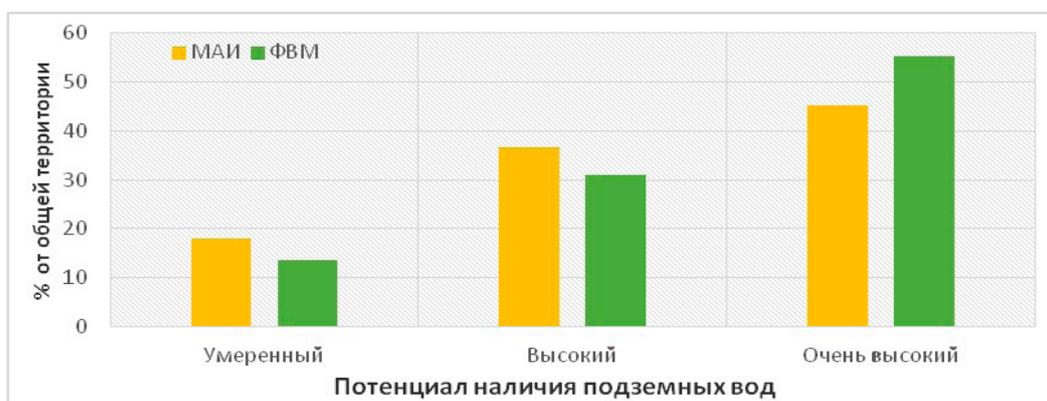


Рис. 6. Распределение площадей зон с различным потенциалом наличия подземных вод на территории Горецкого р-на, идентифицированных различными методами

Заключение

Полученные результаты дают основание утверждать, что совместное использование данных дистанционного зондирования и функциональных возможностей ГИС является эффективным инструментом для прогнозирования потенциальных зон залегания подземных вод без выполнения дорогостоящих гидрогеологических исследований.

Как метод анализа иерархий, так и метод оценки факторов множественного влияния могут быть использованы для прогнозирования потенциальных зон залегания подземных вод, однако МАИ более трудоемок по сравнению с ФМВ. В то же время эмпирические суждения в ФМВ, основанные преимущественно на опыте исследователя, и данные из

литературных источников, которые могут быть субъективными, снижают точность прогнозирования с применением данного метода. Кроме того, МАИ позволяет получить растровое изображение с меньшим количеством «шумов», что непосредственно влияет на качество последующего трансформирования раstra в векторный слой и точность определения площадей искомых зон.

Результаты исследования могут быть использованы как местными органами государ-

ственного управления, так и исследователями для разработки мер по оптимизации управления подземными водными ресурсами с целью их охраны и рационального водопотребления.

Дальнейшие исследования следует сосредоточить в направлении оценки точности полученных геопространственных моделей путем сравнения их с интерполированными поверхностями, созданными по данным глубины эксплуатируемых артезианских скважин в пределах территории Горецкого района.

Библиографический список

1. Государственный водный кадастр. Водные ресурсы, их использование и качество вод (за 2019 год) / М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь; М-во здравоохранения Респ. Беларусь; РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов». – Минск, 2020. – 221 с.
2. Suganthi, S. Groundwater potential zonation by remote sensing and GIS techniques and its relation to the groundwater level in the coastal part of the Arani and Koratalai river basin, Southern India / S. Suganthi, L. Elango, S. K. Subramanian // *Earth Sciences Research Journ.* – 2013. – Vol. 17. – № 2. – P. 87–95.
3. Using analytical hierarchy process and multi-influencing factors to map groundwater recharge zones in a semi-arid Mediterranean coastal aquifer / A. Zghibi [et al.] // *Water.* – 2020. – Vol. 12. – P. 2–27. <https://doi.org/10.3390/w12092525>.
4. Нацыянальны атлас Беларусі / М. У. Мясніковіч [і інш.]. – Мінск : Белкартаграфія, 2002. – 292 с.
5. Дуброва, Ю. Н. Комплексный морфометрический анализ территории Горецкого района с использованием данных дистанционного зондирования Земли / Ю. Н. Дуброва, Т. Н. Мыслыва, Т. Н. Ткачева // *Мелиорация.* – 2020. – № 3 (93). – С. 43–54.
6. Arulbalaji, P. Geospatial tool-based morphometric analysis using SRTM data in Sarabanga Watershed, Cauvery River, Salem district, Tamil Nadu, India / P. Arulbalaji, B. Gurugnanam // *Applied Water Science.* – 2017. – Vol. 7. – P. 3875–3883. <https://doi:10.1007/s13201-017-0539-z>.
7. Hsin-Fu Yeh. GIS for the assessment of the groundwater recharge potential zone /Hsin-Fu Yeh, Cheng-Haw Lee, Kuo-Chin Hsu, Po-Hsun Chang // *Environmental Geology.* – 2008. – Vol. 58. – P. 185–195. <https://doi:10.1007/s00254-008-1504-9>.
8. Saaty, T. L. Relative measurement and its generalization in decision making: why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors / T. L. Saaty // *Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Ser. A. Mathematics.* – 2008. – Vol. 102. – № 2. – P. 251–318. <https://doi:10.1007/BF03191825>.
9. Singh, L. K. Multi-criteria analysis and GIS modeling for identifying prospective water harvesting and artificial recharge sites for sustainable water supply / L. K. Singh, M. K. Jha, V. M. Chowdary // *Journ. of Cleaner Production.* – 2017. – Vol. 142. – P. 1436–1456. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.163>.
10. Abrams, W. Delineation of groundwater potential (GWP) in the northern United Arab Emirates and Oman using geospatial technologies in conjunction with Simple Additive Weight (SAW), Analytical Hierarchy Process (AHP), and Probabilistic Frequency Ratio (PFR) techniques / W. Abrams, E. Ghoneim, R. Shew, T. A. LaMaskin // *Journ. of arid Environments.* – 2018. – Vol. 157. – P. 77–96. [Doi:10.1016/j.jaridenv.2018.05.005](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.05.005).

11. Periyasamy, M. Application of geospatial techniques in delineating groundwater potential zones: a case study from South India / M. Periyasamy, A. Subbaiyan, E. Lakshmanan, P. Thirumorthy // *Arabian Journ. of Geosciences*. – 2019. – Vol. 12 (151). – P. 2–15. Doi:10.1007/s12517-019-4289-0.
12. Raju, T. Assessment of groundwater potential zones using multi-influencing factor (MIF) and GIS: a case study from Birbhum district, West Bengal / T. Raju, R. Thapa, S. Gupta, Sh. Guin, H. Kaur // *Applied Water Science*. – 2017. – Vol. 7. – P. 4117–4131. <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0571-z>.
13. Al-Ruzouq, R. Potential groundwater zone mapping based on geo-hydrological considerations and multi-criteria spatial analysis: North UAE / R. Al-Ruzouq, A. Shanableh, T. Merabtene, M. Siddique, M. Ali Khalil, A. E. Idris, E. Almulla // *Catena*. – 2019. – Vol. 173. – P. 511–524. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.037>.
14. Chatterjee, R. S. Potential groundwater recharge in north-western India vs spaceborne GRACE gravity anomaly based monsoonal groundwater storage change for evaluation of groundwater potential and sustainability / R. S. Chatterjee, P. Pranjal, S. Jally, B. Kumar, V. K. Dadhwal, S. K. Srivastav, Dh. Kumar // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2020. – Vol. 10. – Art. 100307. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100307>.
15. Senanayake, I. P. An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Ambalantota, Sri Lanka using GIS techniques / I. P. Senanayake, D.M.D.O.K. Dissanayake, B. B. Mayadunna, W. L. Weerasekera // *Geoscience Frontiers*. – 2016. – Vol. 7, iss. 1. – P. 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.03.002>.
16. Saidi, S. Sensitivity analysis in groundwater vulnerability assessment based on GIS in the Mahdia-Ksour Essaf aquifer, Tunisia: a validation study / S. Saidi, S. Bouri, H. B. Dhia // *Hydrological Sciences Journ.* – 2011. – Vol. 56, iss. 2. – P. 288–304. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.552886>.
17. Kouros, M. Aquifer vulnerability assessment using GIS and fuzzy system: A case study in Tehran-Karaj aquifer, Iran / M. Kouros, N. Ramin, J. M. Vahid // *Environmental Geology*. – 2009. – Vol. 58. – P. 437–446. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1514-7>.

Поступила 12 августа 2021 г.