

П. ИЫГАР

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД КАК ИНДИКАТОР ВОДОУПОРНЫХ СВОЙСТВ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД

Существующие в толщах пород водоносные горизонты могут объединять различные или одинаковые по составу подземные воды. Сходство составов может быть обусловлено или совпадением химико-физических условий (в том числе одинаковым химическим составом водовмещающих пород), или интенсивным водообменом между водоносными горизонтами.

Обратим внимание на вторую причину. Гидрохимические данные для корреляции водоносных горизонтов впервые, по-видимому, применены гидрогеологами Камского филиала ВНИГНИ (Шуробор и др., 1970), которые использовали для этого величины общей минерализации, т. е. отношения ионов $SO_4^{''}/Cl'$ и Na^+Cl' и содержание микрокомпонентов. В условиях карбонатных пород ордовика и силура Северной Эстонии разнообразие типов химического состава подземных вод можно использовать в целях распознавания водоносных горизонтов и водопоров.

Основной осложняющий фактор при этом — неравномерная вскрытость по разрезу водовмещающих пород опробованными на воду буровыми скважинами, вследствие чего извлекаемая вода оказывается смешанной, ее химический состав представляет собой средневзвешенный состав подземных вод вскрытых водоносных горизонтов (слоев) и определяется элементарной формулой

$$c_{rk} = \frac{Q_{1r}c_{1k} + Q_{2r}c_{2k} + \dots + Q_{Nr}c_{Nk}}{Q_{1r} + Q_{2r} + \dots + Q_{Nr}} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{ir}c_{ik}}{\sum_{i=1}^N Q_i} \quad (1)$$

Здесь c_{rk} — концентрация k -го иона ($k = HCO'_3, SO''_4, Cl', Ca'', Mg'', Na'$ и т. д.) в смешанной воде из скважины r ($r = 1, 2, 3, \dots, R$);

$c_{1k}, c_{2k}, \dots, c_{Nk}$ — концентрация k -го иона в воде i -го водоносного горизонта ($i = 1, 2, \dots, N$);

$Q_{1r}, Q_{2r}, \dots, Q_{Nr}$ — дебит скважины r из i -го водоносного горизонта при совместном опробовании нескольких водоносных горизонтов.

Для напорных вод дебит скважины в одном водоносном горизонте равен

$$Q_{ir} = \frac{2,73k_i m_{ir} S_{ir}}{\log \frac{R_i}{r}} \quad (2)$$

- где k_1, k_2, \dots, k_N — коэффициенты фильтрации пород i -го водоносного горизонта;
 $m_{1r}, m_{2r}, \dots, m_{Nr}$ — мощности вскрытых частей i -го водоносного горизонта в скважине r ;
 $S_{1r}, S_{2r}, \dots, S_{Nr}$ — истинные понижения уровня воды в i -м водоносном горизонте;
 R_1, R_2, \dots, R_N — радиусы влияния i -го водоносного горизонта;
 r — радиус скважины.

Чтобы в (1) определить средние концентрации k ионов каждого водоносного горизонта $c_{ih} = c_{1h}, c_{2h}, \dots, c_{Nh}$, требуется наличие достаточного количества скважин с соответствующими данными о дебитах и химических составах смешанных вод. Система уравнений, подлежащих решению, состоит из R однотипных уравнений вида (1). Искомые концентрации предлагаем вычислять по формуле

$$c_{ih} = \sum_{r=1}^R \frac{p_{ir}}{\sum_{r=1}^R p_{ir}} c_{rh}. \quad (3)$$

$$\text{Здесь } p_{ir} = \frac{Q_{ir}}{\sum_{i=1}^N Q_{ir}} = \frac{k_i m_{ir} S_{ir}}{\sum_{i=1}^N \log \frac{R_i}{r} \sum_{i=1}^N \frac{k_i m_{ir} S_{ir}}{R_i}}. \quad (4)$$

Определив величину водопроводимости i -го водоносного горизонта в пределах скважины r по формуле

$$T_{ir} = k_i m_{ir} \quad (5)$$

и допустив, что радиусы влияния R_i ($i = 1, 2, \dots, N$) и, тем более, выражения $\log \frac{R_i}{r}$ мало отличаются друг от друга, преобразуем (4) к виду

$$p_{ir} = \frac{T_{ir} S_{ir}}{\sum_{i=1}^N T_{ir} S_{ir}}. \quad (6)$$

Целесообразность и обоснованность формул типа (3), определяющих значения параметров, показана ранее (Иыгар, 1972).

По определению Д. Агапьева (1958), истинное понижение уровня воды в каждом водоносном горизонте равно

$$S_{ir} = S_r - N_{ir}, \quad (7)$$

где S_r — суммарное понижение уровня (разница между суммарным статическим и динамическим уровнями) в скважине r ;

N_{ir} — величина снижения или повышения пьезометрического уровня h_i i -го горизонта по отношению к суммарному уровню h_r в скважине r .

Следовательно, отношение p_{ir} зависит не только от абсолютных величин суммарных понижений S_r , но и главным образом от глубины залегания отдельных пьезометрических уровней h_i относительно h_r .

Отметим еще, что величину S_{ir} можно не учитывать, если суммарное понижение S_r достаточно велико и если пьезометрические уровни каждого водоносного горизонта h_i располагаются близко друг к другу. В таком случае значение

$$p_{ir} = \frac{T_{ir}}{\sum_{i=1}^N T_{ir}} \quad (8)$$

мало отличается от значения p_{ir} по формуле (6). Для оценки сходства двух составов вод можно пользоваться понятием расстояния. Сходство может выражаться как пифагорова мера расстояний между двумя точками в k -мерном пространстве (Шоу, 1968)

$$d_{ij} = \sqrt{(c_{i1} - c_{j1})^2 + (c_{i2} - c_{j2})^2 + \dots + (c_{ik} - c_{jk})^2}, \quad (9)$$

где $c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{ik}$ и $c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jk}$ — химический состав вод водоносных горизонтов соответственно номера i и j .

Среднее расстояние в пределах одной группы вод, т. е. среднее внутригрупповое расстояние

$$\bar{d}_s = \frac{\sum_{i=1}^L d_{ij}}{L}, \quad (10)$$

должно быть меньше средних расстояний между группами вод, определяемых равенством

$$\bar{d}_v = \frac{\sum_{i=L+1}^M d_{ij}}{M-L}. \quad (11)$$

При этом Х. Харман (Harman, 1960) в качестве признака группы рассматривает скачкообразное увеличение среднего внутригруппового расстояния в том случае, если в группу вовлечены члены посторонних групп, хотя фактически группа исчерпана.

Численный пример. Вычисления выполнены на основе данных 8 эксплуатационных скважин, расположенных в пос. Пээтри и его окрестностях (Пайдеский район ЭССР). Для расчетов из предыдущей работы автора (Йыгар, 1973) взяты величины водопроницаемости T_{ir} , суммарных статических уровней h_r и средние по скважинам высоты пьезометрических уровней h_i (табл. 1). Матрица расстояний d_{ij} , определенных при помощи формулы (9) по средним концентрациям ионов c_{ik} (табл. 2), показывает наличие нескольких различных типов подземных вод:

	S_{1tm}	S_{1jr}	O_{3pk}	O_{3pgA}
S_{1jr}	23,97			
O_{3pk}	20,32	14,76		
O_{3pgA}	24,34	19,56	5,67	
O_{3pgM}	23,12	8,44	7,16	11,42

Как видно, воды тамсалуского (S_{1tm}) и юурского (S_{1jr}) горизонтов значительно отличаются от вод нижележащих горизонтов (среднее \bar{d}_v соответственно 22,94 и 14,25 мг·экв. %). И, наоборот, воды поркуниского

Таблица 1

Значения показателей для расчета средних концентраций c_{ik}

Номер скважины	$T_{tr} \cdot S_{tr}, \text{ м}^3/\text{сут}$						$h_r, \text{ м}$	$S_r, \text{ м}$	$c_{ik}, \text{ мг. экв. \%}$					
	Водоносные слои и их h_i								HCO ₃ '	SO ₄ ''	Cl'	Ca''	Mg''	Na'
	S _{1tr} 80,22	S _{1jr} 77,68	O _{apk} 76,44	O _{apgA} 76,11	O _{apGM} 76,32									
1			27,0 · 24,44	42,3 · 24,11	41,4 · 24,32	74,0	22,0	92	4	4	20	47	33	
2			24,9 · 7,49	39,9 · 7,16	15,0 · 7,47	80,2	11,25	91	4	5	40	52	8	
3				(1,0)		74,3	10,3	91	4	5	52	46	2	
4		46,8 · 6,93	29,0 · 5,69			74,25	3,5	83	11	6	64	27	9	
5		42,5 · 19,53	28,7 · 18,29	39,8 · 18,62		78,15	20,0	84	11	5	40	49	11	
6		6,4 · 4,68	30,4 · 3,44	37,3 · 3,11	167,7 · 3,32	77,7	4,7	82	12	6	75	24	1	
7			30,3 · 11,24	42,3 · 10,91	35,3 · 11,12	73,8	8,6	90	7	3	40	59	1	
8		8,5 · 3,28				79,5	5,1	77	16	7	37	40	23	

Пределы внутригрупповых и межгрупповых расстояний d_{ij} между химическими составами подземных вод, мг. экв. %

Номер группы скважин	Стратиграфические горизонты (водоносные слои)														
	O ₁ vk ¹ O ₁ pk ¹	O ₁ kn	O ₂ as	O ₂ ls	O ₂ th	O ₂ kk	O ₂ id	O ₂ jh	O ₂ kl	O ₂ on	O ₂ rk ² O ₂ pk ²	O ₂ nb ³ O ₂ ps ³	O ₂ vt	O ₂ pg ⁴ O ₂ pk ⁴	S ₁ rk
1	8,08	10,79	16,31	17,76	22,28	33,41	39,4	45,08	51,48	58,88	63,08	67,27	76,82	84,44	91,17
2	23,32	14,77	4,78-9,34	33,92	37,90	8,64	3,94	18,28	51,48	62,87	76,82	84,44	91,17	99,17	107,17
3	22,97	13,82	7,51	7,88	17,20	8,38	0,44	15,71	28,04	38,10	42,44	51,48	62,87	76,82	84,44
4	2,37-11,49	19,52	10,70	22,80	25,31	8,11	2,93	13,99	17,93	26,01	31,10	38,10	42,44	51,48	62,87
5						18,38	30,89	13,86	12,14	5,63	13,49	24,25	31,10	38,10	42,44
6	31,28	3,34-10,58	51,05			8,11	2,93	13,99	17,93	26,01	31,10	38,10	42,44	51,48	62,87
7						14,37	2,14-10,35	27,82	51,48	62,87	76,82	84,44	91,17	99,17	107,17
8	39,56					13,49	6,34-18,75	27,82	51,48	62,87	76,82	84,44	91,17	99,17	107,17
9						12,27	2,07-5,37	21,31	51,48	62,87	76,82	84,44	91,17	99,17	107,17
10						8,72	5,47-10,22	13,49	27,82	51,48	62,87	76,82	84,44	91,17	99,17
11						17,93	3,15-14,56	26,01	31,10	38,10	42,44	51,48	62,87	76,82	84,44
12						42,44	10,41	51,48	62,87	76,82	84,44	91,17	99,17	107,17	115,17
13						8,0	3,62-7,68	11,42	15,82	19,34	23,86	28,38	32,90	37,42	41,94
14						3,2-10,38									
15						27,34	24,80								
16						10,21	3,48-8,39								
17						9,76	5,66-13,23								
18						7,30	0,34-13,39								
19						62,65									
20	23,13					43,49	9,73								
21	65,63					51,40									
22						27,63	11,09								
23						26,08	8,49								
24						22,98	3,34								
25						14,46	1,63-8,63								
26						10,33	2,55								
27						16,14	3,91-7,50								
28						13,58	1,02-2,43								
29						8,44	6,60-11,45								
30						19,56	1,66								
31						7,44	4,82-8,85								
32						15,75	4,18								
33						10,07	3,33-9,51								
34						10,76	4,55-11,16								

Стыки горизонтов	водоносный горизонт																			
	O ₁ vk ¹ O ₁ pk ¹	O ₁ kn	O ₂ as	O ₂ ls	O ₂ th	O ₂ kk	O ₂ id	O ₂ jh	O ₂ kl	O ₂ on	O ₂ rk ² O ₂ pk ²	O ₂ nb ³ O ₂ ps ³	O ₂ vt	O ₂ pg ⁴ O ₂ pk ⁴	S ₁ rk					
Число скачков a^{**}	1	0,7	1	2,75	4,5	1	3,15	2,33	2	1	3,5	0,13	3	4,1	4,61	4	1,33	3	4	4
Число ступеней b	4	3,95	4	4,75	4,5	3	3,25	4,66	6	4,38	6,5	7,4	6	8,21	11,25	11	7,79	10	7	5
Отношение $p=a/b$	0,25	0,18	0,25	0,58	1,0	0,33	0,97	0,5	0,33	0,23	0,54	0,02	0,5	0,5	0,41	0,36	0,17	0,3	0,57	0,80

Примечание: * Столбцами (напр. 8,08 / 17,76) указаны пределы межгрупповых расстояний между данным водоносным горизонтом и всеми нижележащими водоносными горизонтами; рядами (напр., ← 5,17-11,96 →) указаны пределы внутригрупповых расстояний данного водоносного горизонта.

** Число скачков с учетом водопроводимостей тех горизонтов, которые характеризуются одним химическим составом. Штрихами | указаны стыки горизонтов, на которых наблюдается скачкообразное увеличение расстояния d_{ij} ; стрелами ← → указана мощность водоносных горизонтов.

Таблица 2

Средняя концентрация c_{ik} по отдельным водоносным горизонтам
(вычисления по формуле (7))

Ионы	S_{1tm}	S_{1jr}	O_3pk	O_3pgA	O_3pgM
HCO_3^*	77	83,06	87,48	89,57	87,05
SO_4^o	16	11,24	7,84	5,77	8,14
Cl'	7	5,70	4,75	4,66	4,81
$Ca^{..}$	37	54,91	44,93	43,41	50,51
$Mg^{..}$	40	35,06	44,33	48,25	40,07
Na^*	23	10,03	10,74	8,34	9,42

(O_3pk) и пиргуского (O_3pgA и O_3pgM) горизонтов на основании близкого химического состава можно объединить в одну группу ($\bar{d}_S = 8,08$ мг·эquiv. %).

Определение концентрации c_{ik} и соответствующих расстояний по упрощенному выражению p_{ir} (формула (8)) дает очень близкие к указанным в табл. 2 и в матрице расстояний значения c_{ik} и d_{ij} . Результаты вычислений по этим двум способом различаются в среднем не больше чем на 1 мг·эquiv. %.

Особенности гидрогеологического строения Северо-Восточной Эстонии. Данные многочисленных эксплуатационных скважин Раквереского и Пайдеского районов ЭССР послужили хорошим материалом для определения гидрогеологического строения. В зависимости от расположения скважины этой территории были разделены на 34 группы по 4—14 скважины в каждой, причем стратиграфические горизонты были отождествлены с водоносными слоями.

Водоносные горизонты выделяются путем объединения смежных водоносных слоев на основе гидрохимического сходства вод, а водоупоры — на стыках горизонтов, где гидрохимическое сходство (выраженное средним расстоянием \bar{d}_{ij}) превышает некоторый предварительно заданный порог a . Коэффициент d_{ij} между химическими составами одного водоносного горизонта считается в таком случае внутрigrупповым, а между составами разных водоносных горизонтов — межгрупповым.

Во всех группах скважин по мере увеличения глубины между водоносными горизонтами наблюдается увеличение различий химического состава подземных вод. Это сопровождается обычно скачкообразным увеличением расстояний d_{ij} на стыках определенных водоносных горизонтов, что значительно облегчает объединение водоносных слоев в горизонты.

Порогом распознавания водоносных горизонтов принята величина a , равная 10 мг·эquiv. %. Средний коэффициент \bar{d}_{ij} ниже этого порога указывает на сходство химического состава вод и тем самым — на наличие самостоятельного водоносного горизонта. Среднее межгрупповое расстояние \bar{d}_V этого водоносного горизонта со всеми составами других водоносных горизонтов должно превышать 10 мг·эquiv. %.

В табл. 3 приведены нижние и верхние пределы межгрупповых и внутрigrупповых расстояний, определенные по 34 группам скважин на основе средних концентраций ионов c_{ik} водоносных слоев. В результате подсчета установлены стыки горизонтов, на которых наиболее часто наблюдается скачкообразное увеличение расстояний d_{ij} . Как видно из табл. 3, особенно выделяются в этом отношении стыки горизонтов O_2uh/O_2kk , O_2id/O_2jh , O_3nbP/O_3nbS , O_3nbS/O_3vr и S_{1tm}/S_{1rk} .

Скачкообразное увеличение расстояний обусловлено прежде всего типовыми изменениями химического состава подземных вод, которые сохраняются в природных условиях благодаря водоупорам. Региональными водоупорами в северной части рассматриваемой территории являются диктионемовый сланец пакерортского горизонта (O_1pkT), промышленная пачка горючих сланцев кукурзеского горизонта (O_2kk) и, по-видимому, мергели и известняки всего идавереского горизонта (O_2id). Водоупорные свойства карбонатных пород других горизонтов ордовика и силура проявляются лишь участками.

Описанный метод можно рекомендовать как наиболее эффективный для установления гидрогеологического строения при помощи неполных и косвенных гидрогеологических данных.

ЛИТЕРАТУРА

- Агапьев Д. Ф. 1958. Определение фильтрационных свойств пород путем суммарного опробования водоносных горизонтов. Разведка и охрана недр, № 11.
- Йыгар П. 1972. Вычисление параметров водопроницаемости коренных пород. Изв. АН ЭССР, Хим. Геол., 21, № 4.
- Йыгар П. 1973. Определение гидрогеологического строения при помощи суммарных уровней подземных вод. Изв. АН ЭССР, Хим. Геол., 22, № 4.
- Шоу Д. М. 1968. О делении данных в аналитической геохимии на две группы с помощью дистанционного коэффициента. В сб.: Вопросы математической геологии. Л.
- Шуробор Ю. В., Шуробор А. В., Шестов И. Н. 1970. Использование приемов математической статистики для корреляции водоносных горизонтов по гидрохимическим данным. Тр. Камского филиала ВНИГНИ, вып. 72.
- Нагман Н. Н. 1960. Modern factor analysis. Univ. Chicago Press.

Институт геологии
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
12/X 1973

P. JÖGAR

PÕHJAVETE KEEMILINE KOOSTIS KUI VETTPIDAVATE KIVIMITE INDIKAATOR

Artiklis käsitletakse vett sisaldavate kihtide stratifitseerimist summaarse, s. o. mitmest kihist pumbatava põhjavee keemilise koostise abil. Üksikute kihtide põhjavete iga iooni keskmine kontsentratsioon c_{ik} arvutatakse suhtelise tõenäosuse alusel (7), kus $r=1, 2, \dots, R$ (puuraukude arv), $i=1, 2, \dots, N$ (lademete arv) ja p_{ir} — i -nda lademe veejuhtivuse osakaal r -ndas puuraugus. Vett sisaldavate kihtide veehorisontideks ühendamiseks kasutatakse keskmiste koostiste omavahelisi kaugusi. Analüüsiks kasutati Kirde-Eestis asuva 34 puuraukude grupi kohta saadud andmeid (tab. 3).

P. JÖGAR

THE CHEMICAL COMPOSITION OF UNDERGROUND WATERS AS AN INDICATOR OF WATER-RESISTANT ROCKS

The author discusses the stratification of water-containing strata with the help of the chemical composition of summary underground waters, i. e. of those pumped from different strata. The mean concentration c_{ik} of each ion of single strata is calculated on the basis of relative probability (7), where $r=1, 2, \dots, R$ (number of boreholes), $i=1, 2, \dots, N$ (number of strata), p_{ir} — the partial weight share of the water conductivity of the i -th stratum in the r -th borehole. For uniting the water-containing strata into water horizons, the mutual distances of the mean chemical compositions are used. For analysis, the data on a group of 34 boreholes of North-east Estonia were used (Table 3).