

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

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

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

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 <sub>3</sub> '	SO <sub>4</sub> "	Cl'	Ca"	Mg"	Na'
	S <sub>1tr</sub> 80,22	S <sub>1jr</sub> 77,68	O <sub>apk</sub> 76,44	O <sub>apgA</sub> 76,11	O <sub>apgM</sub> 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	



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 keemiliste 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).