

С. В. Кушнір

## Бароосмотичний аналіз як новий метод гідрогеологічних досліджень

(Представлено академіком НАН України Є. Ф. Шилоковим)

*Запропоновано методику бароосмотичного аналізу гідрогеологічних даних для окремих свердловин, за якою визначаються величина бароосмотичного напору  $H_2O$  у пластових (порових) водах і ступінь відхилення їх від стану бароосмотичної рівноваги на кількох водоносних горизонтах. Результати аналізу для чотирьох свердловин з різних регіонів підтвердили існування вертикальних бароосмотичних потоків у глинистих товщах усіх розрізів і дали змогу визначити напрями цих потоків та виявити зони впливу особливих локальних гідрогеологічних процесів.*

У роботі [1] показано, що в глибинному концентруванні вод артезіанських басейнів можуть брати участь різні процеси дифузійної природи, але на глибинах до 1000–1500 м вирішальну роль повинен відігравати бароосмос через глинисті товщі під впливом градієнта осмотичного напору в пластових водах. Результатом бароосмосу в спокійній тектонічній обстановці є повільне формування певної вертикальної гідрогеохімічної зональності (ВГХЗ) підземних вод, яку нерідко деформують локальні гідрогеологічні процеси (дифузія солей із солених відкладів, просочування поверхневих вод по розломах, проникнення гідротермальних вод у зонах активного вулканізму тощо). У даній роботі розглядаються прояви бароосмотичного концентрування підземних вод на прикладах окремих гідрогеохімічних розрізів у різних геологічних структурах.

Осмотичний напір води ( $P_{o.n}$ ) у пластових водах визначається різницею між гідростатичним і осмотичним тиском у цих водах:  $P_{o.n} = P_{гiдp} - P_{oсm}$ . Під впливом цього “напору” молекули  $H_2O$  можуть виштовхуватись із розчину ( $P_{o.n} > 0$ ), всмоктуватись у розчин з навколишнього середовища ( $P_{o.n} < 0$ ) або при  $P_{o.n} = 0$  знаходиться у стані бароосмотичної рівноваги.

Отже, в усіх випадках, коли  $P_{o.n} \neq 0$ , концентрація розчинів у пластових умовах мусить змінюватись самочинно доти, поки їх осмотичний тиск не зрівняється з гідростатичним тиском і не настане бароосмотична рівновага. Тому при опусканні артезіанських вод в глибини Землі вони повинні змінювати свою концентрацію так, щоби їх  $P_{oсm}$  був якомога ближчим до  $P_{гiдp}$  у даному водоносному горизонті. Але для реалізації цієї властивості підземних вод необхідно, щоби вони знаходились в тонкопористому осаді або були відокремлені від сусідніх водоносних горизонтів пластами таких осадів (наприклад, глин), які за малої пористості мають властивості напівпроникних мембран. Оскільки глинисті мембрани не здатні затримувати солі повністю, осмотичний потік  $H_2O$  через глинисті товщі завжди несе з собою певну частку найбільш рухливих іонів розчину [2]. Якщо два водоносні горизонти розділені глинистим водотривом і містять води з різними  $P_{o.n}$ , то бароосмотичний потік молекул  $H_2O$  спрямовується у горизонт з меншим  $P_{o.n}$ , де розчин, як правило, більш віддалений від стану бароосмотичної рівноваги.

Для практичних досліджень ми розшукали серед літературних даних 4 свердловини з достатньо повними гідрогеохімічними характеристиками відповідних розрізів, які мають

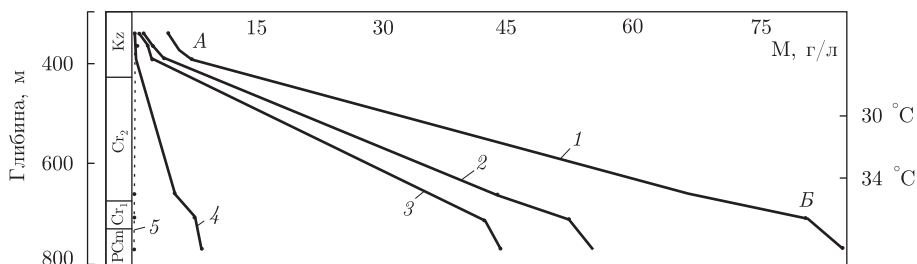


Рис. 1. Зміна хімічного складу підземних вод ( $C$ , г/л), за даними глибокої свердловини Чкалово [3, с. 309]. Тут і на рис. 2: 1 – мінералізація; 2 –  $\text{Cl}^-$ ; 3 –  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ; 4 –  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ; 5 –  $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$

чітко виражені зони ВГХЗ (рис. 1–4). Щоб з'ясувати стан пластових (або порових) вод в цих зонах, проведемо їх бароосмотичний аналіз (БОА). Сам аналіз ґрунтується на таких припущеннях.

1. Осмотичний тиск в усіх пластових водах при мінералізації ( $M$ ) < 100 г/л можна оцінювати за величиною їх мінералізації за графіком для розчинів морської солі [1, рис. 2], приймаючи, що процентна концентрація  $C(\%) \simeq 0,1 M$ .

2. Середня температура пластових вод до глибини 1000 м дорівнює 25 °С.

3. Гідростатичний тиск у пластових водах залежить тільки від глибини їх залягання і змінюється за градієнтом 1 МПа на 100 м.

4. Усі глинисті товщі мають більш або менш явно виражені властивості напівпроникних мембран.

Для кожного розрізу на кривій мінералізації будемо обирати кілька вузлових точок і визначати для них осмотичний напір води та ступінь відхилення від стану бароосмотичної рівноваги:  $\alpha_{\text{осм}} = (P_{\text{о.н}}/P_{\text{гїдр}}) \cdot 100\%$ . Очевидно, що поява бароосмотичного потоку молекул  $\text{H}_2\text{O}$  у розрізі наближає пластові води різних горизонтів до стану бароосмотичної рівноваги, але швидкість цього наближення буде найбільшою на початку цього потоку, біля джерела, з якого дифундують молекули  $\text{H}_2\text{O}$ . Тому величина  $\alpha_{\text{осм}}$  у напрямі потоку повинна збільшуватись<sup>1</sup>. При цьому стан з  $\alpha_{\text{осм}} = 0$  (при  $P_{\text{о.н}} = 0$ ) в якомусь водоносному горизонті зовсім не означає, що осмотичний потік по розрізі припинився; він може зупинитись лише тоді, коли в усіх водоносних горизонтах буде досягнута бароосмотична рівновага.

На рис. 1 і 2 зображені гідрохімічні розрізи двох глибоких свердловин на території Присиваського артезіанського басейну. Вся осадова товща на рис. 1 (св. Чкалово) складається із пластів глин і пісковиків. Як видно, енергійне концентрування пластових вод тут спостерігається з глибини 400 м (точка А,  $M$  7 г/л, 25 °С), розвивається з постійною швидкістю ( $\sim 23$  г/л на 100 м) до глибини 700 м (точка Б,  $M$  81 г/л; 34 °С), а далі дещо сповільнюється. Находимо параметри пластових вод у вузлових точках:

$$\begin{aligned} \text{точка А : } & P_{\text{гїдр}} \simeq 4 \text{ МПа}; \quad C = 0,7\%; \quad P_{\text{осм}} \simeq 0,5 \text{ МПа}, \\ & P_{\text{о.н}} = 4 - 0,5 = 3,5 \text{ МПа}; \quad \alpha_{\text{осм}} = 3,5/4 \cdot 100 = 88\%; \\ \text{точка Б : } & P_{\text{гїдр}} \simeq 7 \text{ МПа}; \quad C = 8,1\%; \quad P_{\text{осм}} \simeq 6,5 \text{ МПа}, \\ & P_{\text{о.н}} = 7 - 6,5 = 0,5 \text{ МПа}; \quad \alpha_{\text{осм}} = 7\%. \end{aligned}$$

<sup>1</sup>Судити про напрям бароосмотичного потоку  $\text{H}_2\text{O}$  за величинами  $\Delta P_{\text{о.н}}$  поки що неможливо, оскільки  $P_{\text{о.н}}$  й  $P_{\text{гїдр}}$  визначаються з великою похибкою; у величині  $\alpha_{\text{осм}}$  ці похибки значною мірою компенсуються.

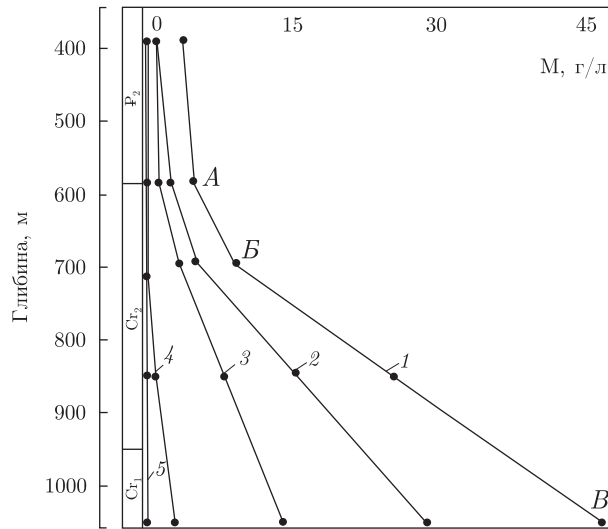


Рис. 2. Зміна хімічного складу підземних вод ( $C$ , г/л), за даними глибокої свердловини Олександрівка [3, с. 309]

Отримані результати дозволяють стверджувати, що осмотичний потік води рухається тут знизу вверх, причому в точці  $B$  вода вже близька до стану бароосмотичної рівноваги.

Розріз на рис. 2 (св. Олександрівка) із глибини 400 м складають значно потужніші пласти глини і мергелів. Тут помітне концентрування підземних вод починається на глибині 580 м (точка  $A$ ,  $M$  5 г/л), але постійний високий ріст мінералізації (11 г/л на 100 м) встановлюється лише з 700 м (точка  $B$ ,  $M$  9 г/л) і залишається таким до кінця розрізу при 1050 м (точка  $B$ ,  $M$  46 г/л). Температури тут невідомі, але, судячи з геотермічного профілю Приваського басейну [3, с. 155], навіть внизу свердловини вони не перевищують  $38^\circ\text{C}$ . Отже, тут геотермічний градієнт явно менший і це може пояснити, чому значне концентрування починається тут на більших глибинах і відбувається вдвічі повільніше, ніж у розрізі рис. 1.

Параметри вод у вузлових точках св. Олександрівка:

$$\text{точка } A: P_{\text{гидр}} \simeq 5,8 \text{ МПа}; \quad C = 0,5\%; \quad P_{\text{осм}} \simeq 0,3 \text{ МПа},$$

$$P_{\text{о.н}} = 5,8 - 0,3 = 5,5 \text{ МПа}; \quad \alpha_{\text{осм}} = 95\%;$$

$$\text{точка } B: P_{\text{гидр}} \simeq 7 \text{ МПа}; \quad C = 0,9\%; \quad P_{\text{осм}} \simeq 0,6 \text{ МПа},$$

$$P_{\text{о.н}} = 7 - 0,6 = 6,4 \text{ МПа}; \quad \alpha_{\text{осм}} = 91\%;$$

$$\text{точка } B: P_{\text{гидр}} \simeq 10,5 \text{ МПа}; \quad C = 4,6\%; \quad P_{\text{осм}} \simeq 3,5 \text{ МПа},$$

$$P_{\text{о.н}} = 10,5 - 3,5 = 7 \text{ МПа}; \quad \alpha_{\text{осм}} = 67\%.$$

Як видно, в усіх точках існують високі осмотичні напори води (але малі їх градієнти), а ступінь відхилення вод від стану бароосмотичної рівноваги з глибиною явно зменшується. Це узгоджується з напрямом осмотичного потоку знизу вверх, але з набагато меншою швидкістю, ніж у водах розрізу з рис. 1.

На рис. 3 зображений літолого-гідрохімічний розріз Давидівської площі (св. 4-К) з північної частини Прип'ятського нафтогазоносного басейну. На кривій мінералізації тут виділяються два невеликі максимуми — точка  $A$  (220 м,  $M$  23 г/л) та  $B$  (440 м,  $M$  25 г/л) — після

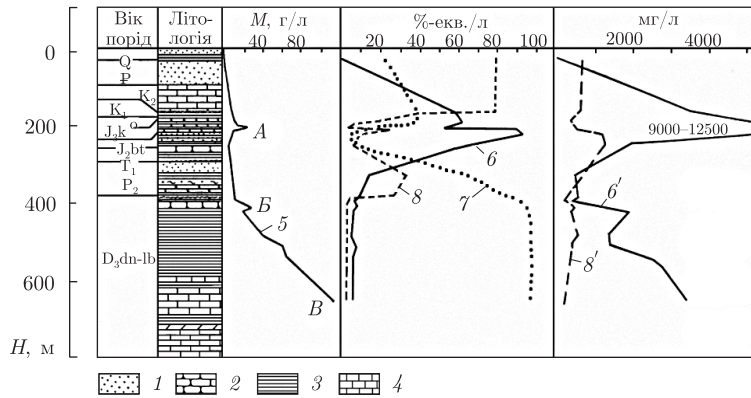


Рис. 3. Літолого-гідрохімічний розріз свердловини 4-К Давидівської площі, за [4].  
 Умовні позначення: 1 – пісок; 2 – пісковик; 3 – глинисті відклади; 4 – вапняк.  
 Характеристика порових розчинів: 5 – мінералізація; концентрація: 6, 6' –  $\text{SO}_4^{2-}$ ; 7 –  $\text{Cl}^-$ ; 8, 8' –  $\text{HCO}_3^-$

яких починається крутий, майже прямолінійний підйом ( $\sim 42$  г/л на 100 м) через глинисту товщу до точки В (640 м, М 100 г/л). Характеристики вод у вузлових точках рис. 3:

$$\begin{aligned} \text{точка А: } & P_{\text{гiдр}} \simeq 2,2 \text{ МПа; } C = 2,3\%; P_{\text{осм}} \simeq 1,6 \text{ МПа,} \\ & P_{\text{о.н}} = 2,2 - 1,6 = 0,6 \text{ МПа; } \alpha_{\text{осм}} = 27\%; \\ \text{точка Б: } & P_{\text{гiдр}} \simeq 4,4 \text{ МПа; } C = 2,5\%; P_{\text{осм}} \simeq 1,8 \text{ МПа,} \\ & P_{\text{о.н}} = 4,4 - 1,8 = 2,6 \text{ МПа; } \alpha_{\text{осм}} = 59\%; \\ \text{точка В: } & P_{\text{гiдр}} \simeq 6,4 \text{ МПа; } C = 10\%; P_{\text{осм}} \simeq 8,5 \text{ МПа,} \\ & P_{\text{о.н}} = 6,4 - 8,5 = -2,0 \text{ МПа; } \alpha_{\text{осм}} = -31\%. \end{aligned}$$

Як видно, в цьому розрізі всі води досить близькі до стану бароосмотичної рівноваги, але в точці В несподівано з'явився негативний осмотичний напір. Можна припустити, що це пов'язане з впливом вищої від  $25^\circ\text{C}$  температури на цій глибині. Але перерахунок осмотичних тисків для  $60^\circ\text{C}$  дав фактично таку саму картину відхилень від бароосмотичної рівноваги:

$$\begin{array}{lll} \text{точка А} & \text{точка Б} & \text{точка В} \\ P_{\text{осм}} \simeq 1,7 \text{ МПа; } & P_{\text{осм}} \simeq 2,0 \text{ МПа; } & P_{\text{осм}} \simeq 9,5 \text{ МПа;} \\ P_{\text{о.н}} = 0,5 \text{ МПа; } & P_{\text{о.н}} = 2,4 \text{ МПа; } & P_{\text{о.н}} = -3,0 \text{ МПа;} \\ \alpha_{\text{осм}} = 23\%; & \alpha_{\text{осм}} = 55\%; & \alpha_{\text{осм}} = -45\%. \end{array}$$

Із цього можна зробити такі висновки: а) результати бароосмотичного аналізу мало залежать від вибору середньої температури для конкретного гідрогеологічного розрізу; б) аномально високий осмотичний тиск вод у точці В можна пояснити лише локальним підтоком глибинних розсолів у вапняковій товщі.

Параметри точок А і Б засвідчують, що в даному випадку осмотичний потік  $\text{H}_2\text{O}$  спрямований зверху вниз, тобто тут вже йде розсолонення пластових вод по розрізу, яке, судячи з величин  $\alpha_{\text{осм}}$ , тривало вже дуже довго. Причиною такого руху слід вважати стан вод у точці В, де виник своєрідний “вакуум” для молекул  $\text{H}_2\text{O}$ .

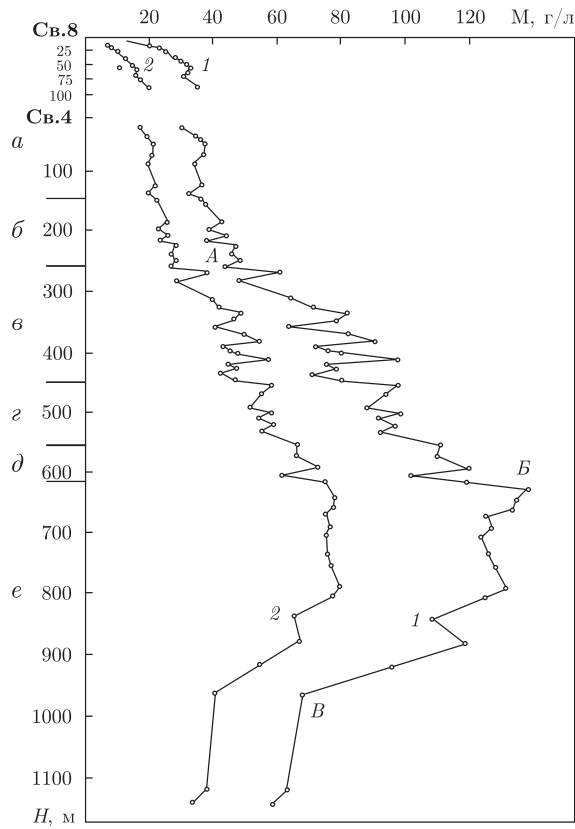


Рис. 4. Мінералізація (1) і вміст хлору (2) в порових водах четвертинних і пліоценових відкладів Південного Каспію, за [5]. Свердловини 8 і 4.

Відклади: а — четвертинні; б — верхній апшерон; в — середній апшерон; г — нижній апшерон; д — акчагил; е — продуктивна товща

Рис. 4 характеризує порові води четвертинних і верхньопліоценових відкладів Південного Каспію. Як видно, концентрування вод в четвертинних глинистих відкладах в обох свердловинах спостерігається вже з перших замірів на глибині близько 20 м зі швидкістю  $\sim 20$  г/л на 100 м. Але з глибини  $\sim 75$  м концентрування сповільнюється, щоб з 250 м (точка А, М 44 г/л) знову розвинулись до попередньої швидкості. На глибині 630 досягається максимальна солоність вод (точка В, М 136 г/л), після чого вона швидко зменшується до  $\sim 64$  г/л на глибині 970 м (точка В). Отже, маємо приклад зміни характеру вертикальної гідрохімічної зональності від прямої до оберненої. Розглянемо характеристики вод у виділених вузлових точках:

$$\text{точка А: } P_{\text{гидр}} \simeq 2,5 \text{ МПа; } C = 4,4\%; \quad P_{\text{осм}} \simeq 3,4 \text{ МПа,}$$

$$P_{\text{о.н}} = 2,5 - 3,4 = -0,9 \text{ МПа; } \alpha_{\text{осм}} = -36\%;$$

$$\text{точка В: } P_{\text{гидр}} \simeq 6,3 \text{ МПа; } C = 13,6\%; \quad P_{\text{осм}} \simeq 11,8 \text{ МПа,}$$

$$P_{\text{о.н}} = 6,3 - 11,8 = -5,5 \text{ МПа; } \alpha_{\text{осм}} = -87\%;$$

$$\text{точка В: } P_{\text{гидр}} \simeq 9,7 \text{ МПа; } C = 6,4\%; \quad P_{\text{осм}} \simeq 3,6 \text{ МПа,}$$

$$P_{\text{о.н}} = 9,7 - 3,6 = 6,1 \text{ МПа; } \alpha_{\text{осм}} = 63\%.$$

Негативний осмотичний напір вод в точках *A* і *B* можна вважати ознакою того, що відповідні водоносні відклади піднялись відносно недавно на значну висоту (або відповідно знизився рівень води у Каспійському морі), і зараз відбувається розсолонення порових вод бароосмотичним потоком води зверху вниз ( $\alpha$  у точці *A* ближче до нуля, ніж у точці *B*). Але в точці *B* вже бачимо позитивний напір, який змушує порові води віддавати частину  $H_2O$  вверх по розрізу, прискорюючи тим самим наближення вод точки *B* до бароосмотичної рівноваги. Але цей висновок може бути справедливим лише в тому випадку, коли пластовий тиск у водах зони точки *B* дорівнює гідростатичному тиску. Насправді він, мабуть, значно більший, оскільки в нижче розташованому продуктивному горизонті (зона “e”), згідно з [5], пластові тиски на 6–7 МПа перевищують  $P_{\text{гдр}}$  (зона АВПТ). Тому, наприклад, якщо в зоні *B* подібне збільшення досягне 5,5 МПа, то там виникне бароосмотична рівновага ( $P_{\text{пласт}} = P_{\text{осм}}$ ) і бароосмотичний потік  $H_2O$  до зони *B* припиниться. Отже, зафіксований на рис. 4 концентраційний профіль *A* – *B* цілком може бути картиною, “замороженою” з часу виникнення цього АВПТ.

Подібної неоднозначності немає в інтерпретації кривих росту мінералізації в обох свердловинах на глибинах 20–75 м. Тут явно відбувається інтенсивне розсолонення порових вод осмотичним потоком молекул  $H_2O$  із вод Каспійського моря, яке має  $M$  13,1 г/л і, згідно із нашими розрахунками,  $P_{\text{осм}} = 0,95$  МПа. При цьому об’єктом розсолонення є порові води з  $M$  35–40 г/л, які сформувались в минулому разом з ранньочетвертинними осадами. Все це засвідчує, що в нафтогазоносних провінціях, де поширені води з АВПТ, застосовувати бароосмотичний аналіз потрібно дуже обережно.

Необхідно відзначити, що загальний характер збільшення мінералізації вод з глибиною в глинистих товщах на рис. 1–4 однотипний:  $M$  зростає, як правило, за лінійним законом, особливо на глибинах понад 400 м. Це дозволяє припускати, що в глинистих водотривах завжди встановлюються певні стаціонарні бароосмотичні потоки, швидкість яких визначається градієнтами осмотичного напору води. Для перевірки цього припущення ми зіставили швидкості концентрування вод на рис. 1–4 з градієнтами осмотичного напору води ( $\Delta P_{\text{о.н}}$  на 100 м) для відповідних глибин (табл. 1). Як видно, динаміка росту мінералізації вод дійсно залежить від  $\Delta P_{\text{о.н}}$  навіть при розсолоненні розрізу (див. рис. 3, 4). При цьому пропорційність  $V$  і  $\Delta P_{\text{о.н}}$  порушується лише у випадку рис. 2, де глибина залягання глинистих товщ перевищує 700 м і осмотична проникність їх значно зменшується через сильніше пресування. Виявлена залежність між  $V$  і  $\Delta P_{\text{о.н}}$  є прямим доказом реальності бароосмотичних потоків у всіх розрізах і засвідчує, що осмотична проникність різних глинистих товщ на глибинах до 700 м приблизно однакова.

Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що всі розглянуті зони ВГХЗ дійсно створені бароосмотичними процесами в глинистих товщах, а запропонована методика БОА дає можливість не лише знаходити відхилення від стану бароосмотичної рівноваги для більшості підземних вод, а й визначати напрями осмотичних потоків  $H_2O$  (вверх або вниз по розрі-

Таблиця 1. Динаміка концентрування підземних вод у зв’язку з осмотичним напором води

Свердловина, інтервал	Глибина, м	$V_{\text{конц.}}$ , г/л на 100 м	$\Delta P_{\text{о.н}}$ на 100 м
Рис. 1, А–Б, за [3]	400–700	23	1,0
Рис. 2, Б–В, за [3]	700–1050	11	0,17
Рис. 3, Б–В, за [4]	440–640	42	2,3
Рис. 4, А–Б, за [5]	250–630	20	1,2

зу), а також виявляти зони впливу локальних гідрогеологічних процесів, які деформують нормальну структуру ВГХЗ. Таку методику можна рекомендувати як новий ефективний спосіб наукових досліджень у гідрогеології.

1. *Кушнір С. В.* Про причини глибинного концентрування вод артезіанських басейнів у зоні гіпергенезу (фізико-хімічний аналіз) // Доп. НАН України. – 2008. – № 7. – С. 111–117.
2. *Hanshaw B. B., Coplen T. B.* Ultrafiltration by a compacted clay membrane II. Sodium ion exclusion at various ionic strengths // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1973. – **37**, No 10. – P. 2311–2327.
3. *Бабинец А. Е.* Подземные воды юго-запада Русской платформы. – Киев: Изд-во АН УССР, 1961. – 378 с.
4. *Кудельский А. В., Козлов М. Ф., Матвеева Л. И.* О природе поровых растворов Давыдовской площади (Припятская впадина) // *Гидрогеологические критерии оценки перспектив нефтегазоносности.* – Минск: Наука и техника, 1971. – С. 272–280.
5. *Пушкина З. В.* Поровые воды глинистых пород и их изменения по разрезу // *Постседиментационные изменения четвертичных и плиоценовых отложений Бакинского архипелага* : Тр. Ин-та геологии АН СССР. Вып. 115. – Москва: Наука, 1965. – С. 160–203.

*Інститут геології і геохімії  
горючих копалин НАН України, Львів*

*Надійшло до редакції 03.03.2009*

**S. V. Kushnir**

### **Barosmotic analysis as a new method of hydrogeological studies**

*Methods of barosmotic analysis of hydrogeological data for separate boreholes have been proposed. They can be applied to determine the barosmotic pressure of H<sub>2</sub>O in formational (porous) waters and the degree of their defection from the state of barosmotic balance at several water-bearing horizons. The results of analysis conducted at 4 boreholes from different regions have confirmed the existence of vertical barosmotic flows in clayey units of all sections and have allowed us to determine the directions of these flows and to reveal the zones affected by specific local hydrogeological processes.*