

**ПОНЯТИЕ СОЛЬВОМОЛЯЛЬНОСТИ КАК ЭТАП В РАЗВИТИИ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ  
О СТРУКТУРНО-ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ РАСТВОРОВ:  
К ЮБИЛЕЙНЫМ ДАТАМ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Г.А. КРЕСТОВА  
И СОЗДАНИЯ НОСЯЩЕГО ЕГО ИМЯ ИНСТИТУТА ХИМИИ РАСТВОРОВ РАН**

**Е.В. Иванов**

*В этой статье, приуроченной к юбилейным датам со дня рождения члена-корреспондента РАН Геннадия Алексеевича Крестова и основания носящего теперь его имя академического Института химии растворов (ИХР РАН), рассмотрена одна из весьма важных страниц «крестовского наследия» в плане новаторского подхода к изучению термодинамических свойств растворов. Речь ведется об известной концепции сольвомоляльности  $c_{sm}$  как рационального способа выражения растворимости газообразных веществ в жидких средах, а также состава неводных и смешанных растворов, содержащих сольватированные неэлектролиты или ионные соединения. Важным аспектом в разработке и всестороннем обосновании преимуществ шкалы  $c_{sm}$  перед другими (традиционными) явилось плодотворное сотрудничество Г.А. Крестова с одним из его первых и наиболее талантливых учеников – профессором Владимиром Ксенофонтовичем Абросимовым. Ровно 45 лет назад в межвузовском сборнике ИХТИ «Термодинамика и строение растворов» вышла их совместная статья, положившая начало использованию понятия сольвомоляльности для интерпретации результатов многих научных исследований как в ивановской «растворной» школе, так и в других научных сообществах. На основе сформулированных авторами указанной работы основных требований, предъявляемых к выбору способа выражения концентрации раствора, показано, что шкала  $c_{sm}$  сохраняет в себе достоинства как молярно-долевой шкалы, так и моляльности (в плане применимости для расчетов термодинамических характеристик растворения в системе Льюиса-Ренделла). Отмечено, что, благодаря взвешенному научному подходу В.К. Абросимова в соавторстве с его учениками и коллегами из ИХР и ИГХТУ, концепция сольвомоляльности нашла успешное применение и при интерпретации объемных эффектов в растворе, в том числе сопряженных с изотопным протиево-дейтериевым замещением в молекулах его компонентов.*

**Ключевые слова:** сольвомоляльность, растворимость, термодинамические характеристики растворения и сольватации

**THE SOLVOMOLALITY CONCEPT AS A STEP IN DEVELOPING THE IDEAS  
OF STRUCTURE-THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF SOLUTIONS: DEDICATED  
TO THE ANNIVERSARIES OF THE BIRTH OF G.A. KRESTOV AND THE FOUNDATION  
OF THE INSTITUTE OF SOLUTION CHEMISTRY OF RAS BEING NAMED AFTER HIM**

**E.V. Ivanov**

*Being dedicated to the anniversary dates of the birth of Gennady Krestov, the corresponding member of Russian Academy of Sciences, and the foundation of the Institute of Solution Chemistry (ISC RAS) now named after him, this paper examines one of very important pages of the “Krestov’s heritage” in terms of an innovative approach to studying the thermodynamic properties of solutions. We are talking here about the well-known solvomolality  $c_{sm}$  concept as a rational form of expressing the solubility of gaseous substances in liquid media and the composition of non-aqueous and mixed solutions containing solvated non-electrolytes or ionic compounds. An important point*

*in the development and comprehensive justification of the advantages of the  $c_{sm}$  scale over other (traditional) ones was the fruitful cooperation of G.A. Krestov with one of his first and most talented followers Prof. Vladimir Abrosimov. Their joint paper published 45 years ago in the interuniversity collection “Thermodynamics and Structure of Solutions” of the Ivanovo’s ChemTech was marked the beginning of the use of the solvomolality concept for interpreting the results of many scientific studies in both the local “solution” school and other scientific communities. On the basis of the key requirements formulated by the authors of this work to choice of the method of expressing the solution concentration, it is shown that the  $c_{sm}$  scale retains all advantages of both the mole-fraction scale and the molality one (in terms of applicability for calculating the thermodynamic characteristics of dissolution in the Lewis-Rendell system). It is also highlighted that owing to the deliberated scientific approach by V.K. Abrosimov, in collaboration with his followers and colleagues from ISC RAS and ISUCT, the solvomolality concept has found successful application in the interpreting the volume effects in solution, including those associated with the isotopic protium-deuterium substitution in the molecules of its components.*

**Keywords:** solvomolality, solubility, thermodynamic characteristics of dissolution and solvation



**Евгений Викторович  
Иванов**  
Evgeniy V. Ivanov  
evi@isc-ras.ru

Лаборатория термодинамики растворов неэлектролитов и биологически активных веществ, Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, ул. Академическая, 1, Иваново, Российская Федерация, 153045

*Область научных интересов*

Термодинамика водных растворов неэлектролитов и водосодержащих органических сред различной функциональной природы, включающих биоактивные соединения ациклического (алканола, амиды, аминокислоты) и аминального (производные адамантана) строения, а также фармакологически перспективные алициклические и бициклические производные карбамида (имидазолидиноны, пиридининоны и бисмочевины октанового ряда или гликольурилы); анализ H/D-изотопных эффектов растворителя в термодинамических характеристиках растворения и гидратации (сольватации) неэлектролитов как инструмент исследования структурного состояния жидкой системы и межмолекулярных взаимодействий в ней с использованием экспериментальных методов прецизионной денсиметрии, калориметрии растворения/разведения и ЯМР-спектроскопии, а также различных модельных подходов.

Laboratory of Thermodynamics of Solutions of Non-Electrolytes and Biologically Active Substances, G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry of the RAS, Akademicheskaya st., 1, Ivanovo, 153045, Russia

*Area of scientific interests*

Thermodynamics of aqueous solutions of nonelectrolytes and water-containing organic media of various functional nature, including bioactive compounds of acyclic (alkanols, amides, amino acids) and amina (adamantane derivatives) structures, as well as pharmacologically promising alicyclic and bicyclic urea derivatives (imidazolidinones, pyridiminones and octane-series bisureas or glycolurils); analysis of the H/D isotope effects of a solvent in the thermodynamic characteristics of dissolution and hydration (solvation) of nonelectrolytes as a tool for studying the structural state of a liquid system and intermolecular interactions in it using experimental methods of precision densimetry, dissolution/dilution calorimetry and NMR spectroscopy, as well as various model approaches.

**Для цитирования:**

Иванов Е.В. Понятие сольвомоляльности как этап в развитии представлений о структурно-термодинамических характеристиках растворов: к юбилейным датам со дня рождения Г.А. Крестова и создания носящего его имя Института химии растворов РАН. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 10. С. 6–15

**For citation:**

Ivanov E.V. The solvonomolality concept as a step in developing the ideas of structure-thermodynamic characteristics of solutions: dedicated to the anniversaries of the birth of G.A. Krestov and the foundation of the Institute of Solution Chemistry of RAS being named after him. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*, 2021. V. 64. N 10. P. 6–15

ПРЕДИСЛОВИЕ



«...при термодинамическом анализе реакций (процессов) в растворах ... необходимо обязательно выяснить роль среды, поскольку изменения термодинамических характеристик растворителя очень часто являются движущей силой процесса».

(Г.А. Крестов)

Так уж исторически сложилось, что Институт химии растворов Российской академии наук – ИХР РАН (изначально именуемый Институтом химии неводных растворов АН СССР) был образован в год 50-летнего юбилея его основателя и первого руководителя – члена-корреспондента АН СССР (РАН), профессора Геннадия Алексеевича Крестова. И сегодня, спустя уже сорок лет, достойно сохраняя традиции *крестовской научной школы*, мы отмечаем не только очередную юбилейную годовщину создания ИХР РАН, но и 90-летнюю дату со дня рождения выдающегося ученого и организатора науки в области физикохимии растворов, имя которого теперь гордо носит академический институт.

Проведенные под руководством Г.А. Крестова фундаментальные научные разработки, в том числе на основе предложенного им *структурно-термодинамического подхода* [1-4], позволяющего количественно описывать растворы как химически организованные системы, внесли весомый вклад в разрешение многих проблем, касающихся процесса сольватации и состояния в растворе атомно-молекулярных и заряженных частиц. Идеи и замыслы Г.А. Крестова, а также его учеников и спо-

движников, во многом предопределили дальнейшее развитие теоретической и экспериментальной (прикладной) химии в области исследования смешанных и неводных растворов.

Ключевые вехи деятельности Г.А. Крестова как незаурядного ученого и основателя прославленной ныне ивановской «растворной» школы, а также его заслуги перед отечественной и мировой наукой, нашли свое отражение в многочисленных научных публикациях и целом ряде библиографических изданий (достаточно привести работы [5-7]). Поэтому вряд ли имеет смысл снова заостряться на этом вопросе, а коснемся здесь лишь одной из наиболее важных страниц «крестовского наследия» в плане новаторского подхода к изучению физико-химических и термодинамических свойств растворов.

Речь идет о понятии *сольвомоляльности* как концептуальном подходе к выражению состава бинарной или более сложной (по числу компонентов) жидкофазной системы, содержащей неэлектролиты или ионные соединения.

Ровно 45 лет назад в межвузовском сборнике ИХТИ «Термодинамика и строение растворов» вышла известная статья [8] под авторством Г.А. Крестова и одного из его первых и, по общему признанию, наиболее талантливых учеников (впоследствии – заслуженного деятеля науки РФ, профессора) В.К. Абросимова [9, 10]. В статье, наряду с обсуждением выбора стандартного состояния системы для вычисления термодинамических функций растворения газообразных и твердых веществ в жидкой среде, по сути, впервые было дано обоснование к использованию концентрационной шкалы сольвомоляльностей,  $c_{sm}$ , как зачастую наиболее предпочтительной в вычислениях подобного рода. Правомерность выводов, сделанных авторами [8] и развитых ими в целом ряде последующих работ [11-13], подтверждена результатами многочисленных экспериментальных исследований, скомпилированными в обзорах и монографических изданиях [13-16].

С точки зрения полноты и достоверности извлекаемой информации предложенный способ выражения состава раствора ( $c_{sm}$ ) оказался наиболее востребованным при изучении растворимости газообразных веществ [11-15, 17-20]. Во многом это связано с наличием термодинамически обосно-

ванной зависимости стандартных значений свободной энергии Гиббса,  $\Delta_{\text{sol}}G_A^{\circ}$ , и энтропии,  $\Delta_{\text{sol}}S_A^{\circ}$ , процесса растворения вещества (далее – А) от выбора концентрационной шкалы (в отличие, скажем, от энтальпийной,  $\Delta_{\text{sol}}H_A^{\circ}$ , и теплоемкостной,  $\Delta_{\text{sol}}C_{p,A}^{\circ}$  составляющих) [8,13]. Важное место «концепции» сольвомолярности отводилось также в работах по изучению «солевых эффектов» – высаливания (salting-out) или всаливания (salting-in) – в тройных жидких системах, содержащих растворенные газы и электролиты (или молекулярные соединения) [13, 17, 21-23].

Учитывая это, шкала  $c_{sm}$  как способ выражения концентрации в настоящее время упоминается, в основном, в справочной литературе по растворимости соединений (А), находящихся в газообразном состоянии, в жидких средах различной химической природы [13-15, 24-28]. В соответствии с заимствованным из IUPAC-NIST Solubility Database определением  $c_{sm}$  [26, 27]: «сольвомолярность является мерой *сравнительной растворимости* вещества в смеси какого-либо растворителя и эталонного растворителя». Очевидно, что Г.А. Крестов и В.К. Абросимов в упомянутых выше работах [8, 12] подразумевали несколько иное трактование сольвомолярности ( $c_{sm}$ ) и построенной на этом понятии концентрационной шкалы. Последняя, к слову сказать, благодаря взвешенному научному подходу проф. Абросимова (к сожалению, ныне уже покойного [9]) в соавторстве с его учениками и коллегами из ИХР РАН и ИГХТУ нашла свое успешное применение и при интерпретации объемных эффектов, в том числе сопряженных с протиево-дейтериевым замещением в молекулах компонентов раствора. В этой связи достаточно обратиться к результатам лишь некоторых из исследований подобного рода, проведенных за последние два десятилетия [29-33].

Обращаясь снова к известным событиям, предопределившим научное содержание данного сообщения, рассмотрим вкратце существо проблемы, которая сподвигла авторов [8] к разработке концепции сольвомолярности (шкалы  $c_{sm}$ ) как одной из наиболее удобных и обоснованных (с точки зрения термодинамики) рациональных форм выражения состава раствора.

#### К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ СОЛЬВОМОЛЯЛЬНОСТИ

Инициированные развитием структурно-термодинамического подхода [1-3] систематические исследования процессов растворения и сольватации неэлектролитов (в том числе газообразных веществ) и ионных соединений поставили ряд вопро-

сов о соответствии существующих критериев описания свойств растворов получаемым экспериментальным результатам и выводам на их основе. Важное место стало отводиться выбору рациональной шкалы для расчета стандартных термодинамических функций растворения (прежде всего,  $\Delta_{\text{sol}}G_A^{\circ}$  и  $\Delta_{\text{sol}}S_A^{\circ}$ ) исследуемого вещества при их сопоставлении в ряду различных растворителей [8, 12-14]. Это обусловлено тем, что в случае использования большинства из известных форм выражения концентрации соотношение между числом частиц растворителя L и растворенного вещества А может заметно изменяться. Так, молярность ( $c_m$ ), хотя и связана тесно с формальными параметрами системы Мак-Миллана-Майера (СММ) [34, 35] и с активностью А в растворе [36], зависима от плотности структурной упаковки последнего, а значит, и от температуры. В свою очередь, не зависящая от температуры молярность ( $c_m$ ), является функцией молярной массы  $M_L$ . При этом вносимая диспропорция тем более ощутима, чем значительнее разница в  $M_L$  сравниваемых растворителей. Отсюда, вычисленные с использованием указанных концентрационных шкал значения  $\Delta_{\text{sol}}G_A^{\circ}$  и  $\Delta_{\text{sol}}S_A^{\circ}$  оказываются несопоставимыми. В равной степени это относится и к производным данным термодинамических характеристик по температуре и давлению.

Данные обстоятельства позволили авторам [8, 12] сформулировать основные требования, которым должен удовлетворять используемый способ выражения концентрации.

Во-первых, концентрация как макроскопическая характеристика раствора должна наиболее полно отражать изменения в межчастичном А–L-взаимодействии под влиянием меняющихся параметров  $T$ ,  $p$ , а также состава растворителя (включая содержание изотопов) и других условий.

Во-вторых, выбранная форма выражения состава раствора должна содержать по возможности меньшее количество переменных параметров, т.е. она должна быть рациональной или т.н. *унитарной* характеристикой.

Наконец, в-третьих, численные значения концентрации вещества А в различных по химическому составу растворителях L, а также вычисленные на основе этих значений термодинамические характеристики растворения (сольватации) должны быть сопоставимы между собой.

В контексте перечисленных выше критериев, условиям унитарной шкалы, на первый взгляд, должна удовлетворять шкала молярных долей ( $x_A$ ). Однако с помощью этой формы выражения концентрации А не удастся детализировать состав как растворителя, так и раствора в целом, что является особенно важным при наличии сильной *гомо-* или *гетероассоциации* между компонентами

с образованием устойчивых структурных единиц (агрегатов) в жидкой системе [14]. И, что наиболее важно, применение молярно-долевой шкалы приводит часто к отказу от традиционно используемой для расчета стандартных термодинамических характеристик системы Льюиса-Ренделла (СЛР) [34, 35, 37], которая, как известно, основана на шкале моляльностей  $c_m$ .

На основе проведенного в [8] всестороннего анализа, Г.А. Крестовым и В.К. Абросимовым была предложена шкала сольвомоляльностей  $c_{sm}$ . Согласно определению, сольвомоляльная концентрация – это *безразмерный рациональный параметр состава раствора, численно равный количеству растворенного компонента  $i$  ( $\equiv A1, A2, \dots$ ), содержащемуся в каждых 55,50843 молях чистого (свободного) растворителя  $L$ :*

$$c_{sm,i} = (n_i/n_L) \cdot 55,50843, \quad (1)$$

где  $n_i$  и  $n_L$  – соответственно количество растворенного вещества и растворителя, а нормирующий множитель 55,50843 (равный количеству вещества  $H_2O$  в 1 кг воды) введен для того, чтобы в водных растворах  $c_m$  и  $c_{sm}$  численно совпадали.

В качестве сравнения в таблице приведены стандартные молярные термодинамические функции переноса аргона из обычной воды в тяжелую при нескольких температурах и  $p = 0,1$  МПа, вычисленные с использованием четырех рассмотренных выше концентрационных шкал.

**Таблица**

**Численные значения изотопных эффектов (ИЭ) в термодинамических характеристиках растворения аргона в воде,  $\Delta_{tr}\Delta_{sol}Y_A^{\infty(\infty)}(Ar; H_2O \rightarrow D_2O)$  [14]**

**Table. Numerical values of isotope effects (IE) in thermodynamic characteristics of argon dissolution in water,  $\Delta_{tr}\Delta_{sol}Y_A^{\infty(\infty)}(Ar; H_2O \rightarrow D_2O)$  [14]**

$\Delta_{tr}\Delta_{sol}Y (= G, S, H)_A^{\infty(\infty)}$	Шкала концентрации	Температура (Т), К		
		278,15	298,15	318,15
$\Delta_{tr}\Delta_{sol}G_A^{\infty,*}$ Дж·моль <sup>-1</sup>	$c_{sm}$	-280(1)	-180(1)	-160(1)
	$x_A$	-280(1)	-180(1)	-160(1)
	$c_M^{**}$	-265(1)	-170(1)	-150(1)
	$c_m$	-30(1)	85(1)	125(1)
$\Delta_{tr}\Delta_{sol}S_A^{\infty,*}$ Дж·моль <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	$c_{sm}$	-7,1(0,1)	-3,0(0,1)	0,8(0,1)
	$x_A$	-7,1(0,1)	-3,0(0,1)	0,8(0,1)
	$c_M^{**}$	-6,9(0,1)	-2,8(0,1)	1,0(0,1)
	$c_m$	-7,8(0,1)	-3,9(0,1)	-0,2(0,1)
$\Delta_{tr}\Delta_{sol}H_A^{\infty,*}$ Дж·моль <sup>-1</sup>	$c_{sm}$	-2250(35)	-1070(10)	-100(30)
	$x_A$	-2250(35)	-1070(10)	-100(30)
	$c_M^{**}$	-2200(35)	-1020(10)	-160(10)
	$c_m$	-2210(35)	-1070(10)	-70(50)

\* В скобках приведены значения среднеквадратичного отклонения

\*\* Допущено, что плотности раствора А в L ( $\rho_s$ ) и растворителя ( $\rho_L$ ) совпадают

\* In parentheses are the values of the standard deviation

\*\* It is assumed that the densities of the solution A in L ( $\rho_s$ ) and the solvent ( $\rho_L$ ) coincide

Из данных таблицы следует, что применение шкал  $c_{sm}$  и  $c_M$  дает существенно отличающиеся результаты. При этом, поскольку соотношение между  $M_L(H_2O)$  и  $M_L(D_2O)$  составляет всего лишь 1,1117, разница в  $\Delta_{sol}G_A^{\infty}$ , связанная с изменением количества вещества в единице массы растворителя (таблица), при переносе Ar из воды в метиловый и этиловый спирты возрастает до ~ 1400 и ~ 2300 Дж·моль<sup>-1</sup>, соответственно [13, 14].

Очевидно, что шкала  $c_{sm}$  сохраняет в себе достоинства как молярно-долевой шкалы (с принятыми допущениями для последней), так и моляльной концентрации (в контексте применимости для расчетов  $\Delta_{sol(v)}Y_A^{\infty}$  в СЛР). При необходимости шкала  $c_{sm}$  легко «конвертируется» в известные другие [8, 13]:

$$\begin{aligned} c_{sm} &= \alpha_{0,A} 55,51 M_L / (V_{0,A} \rho_L) = \\ &= c_m 55,51 M_L = c_M 55,51 M_L / (\rho_s - c_M M_A) = \\ &= x_A 55,51 / (1 - x_A), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\alpha_{0,A}$  – коэффициент Бунзена растворимости газа, {дм<sup>3</sup> А (н.у.)}·(дм<sup>3</sup> L)<sup>-1</sup>;  $V_{0,A}$  – молярный объем газа при н.у., дм<sup>3</sup>·моль<sup>-1</sup>;  $M_{L(A)}$  и  $\rho_{s(L)}$  выражены в кг·моль<sup>-1</sup> и кг·дм<sup>-3</sup>, соответственно.

Развитые в работе [8] представления применимы и для вычисления термодинамических свойств компонентов в смесях со средней молярной массой растворителя:  $\tilde{M}_L = \sum M_{L,j} x_j$ . В частности, в случае разбавленного раствора газа А1 в жидкой среде L, содержащей ионное соединение А2 формулы (1) и (2) с учетом разработанной Г.А. Крестовым модели [1] могут быть преобразованы (в первом приближении) в соотношение:

$$c_{sm(A1)} = \alpha_{0,A} (55,51 M_L + c_{sm(A2)} M_{A2}) / (V_{0,A1} \rho_s), \quad (3)$$

где  $c_{sm(A2)}$  и  $M_{A2}$  – сольвомоляльность и молярная масса электролита.

Важное место шкале  $c_{sm}$  в последние годы отводилось в работах по исследованию объемных характеристик  $H_2O$ ,  $D_2O$  и других растворенных веществ (включая электролиты) в сольватирующих органических средах различной химической природы [16, 29-33, 38]. Во многом это обусловлено тем, что привлечение шкалы  $c_{sm}$  к вычислению стандартных (парциальных при бесконечном разведении) молярных объемов  $V_A^{\infty}$  и объемных параметров парного (тройного) взаимодействия  $v_{AA}$  ( $v_{AAA}$ ) в рамках *неэкстраполяционной* рациональной процедуры [16, 38-40] дает очевидные преимущества перед *традиционными* методами оценки этих характеристик.

Суть указанной процедуры, обоснованность применения которой для более «адекват-

ного» вычисления  $V_A^0$  и сопоставимых значений кажущегося молярного объема  $V_{\phi,A}(c_{sm})$  и  $v_{AA}$  сформулирована В.К. Абросимовым [16, 38,39] на основе концепции [40], состоит в выборе в качестве «опорного» параметра *общего объема* раствора  $V_s(c_{sm})$ :

$$V_s(c_{sm}) = (55.51M_L + c_{sm}M_A)/\rho_s = V_L^* + V_{\phi,A}(c_{sm}), \quad (4)$$

где  $V_L^* = 55.51M_L/\rho_L$ .

В свою очередь, с учетом сделанных в работе [40] выводов:

$$V_{\phi,A}(c_{sm}) = (V_s - V_L^*)/c_{sm} = V_A^0 + v_{AA}c_{sm} + v_{AAA}c_{sm}^2 + \dots \quad (5)$$

Преимущество определяемого уравнением (5) подхода к оценке  $V_A^0$  состоит в том, что эта величина находится в реальной области концентраций, когда значение отрезка, отсекаемого кривой (или прямой) линией на оси ординат, известно с точностью, близкой к точности вычисления  $V_s(c_{sm})$  или  $V_{\phi,A}(c_{sm})$  из экспериментальных данных по плотности. При этом в целом соблюдается постоянство погрешности вычисления  $V_s$  до области высоких разведений [38, 39], что позволяет исключить иллюстрируемый рисунком *эффект граммофонной трубы* погрешностей определения  $V_{\phi,A}$  при  $c_{sm} \rightarrow 0$ .

Другой, пожалуй, не менее важной отличительной особенностью описываемой уравнениями (4) и (5) рациональной процедуры является возможность получения параметров взаимодействия  $v_{AA}$  ( $v_{AAA}$ ) в единицах молярного объема (поскольку шкала  $c_{sm}$  постулируется безразмерной). По мнению авторов [41], это дает возможность более корректного сравнения объемных эффектов *гомо-* и *гетерокомпонентного* взаимодействия между молекулами А и L, сопряженных с перекрытием их сольватных оболочек, как в растворах «текущей» концентрации, так и в гипотетическом состоянии бесконечного разбавления.

Для решения вопроса установления взаимосвязи между  $V_A^0$  и  $v_{AA}$  предлагалось немало моделей, основанных, как правило, на не имеющих физического смысла относительных параметрах, подобных предложенному в работе [41]:  $RC_V = [(V_{\phi,A} - V_A^0)/V_A^0]100\% = (mS_V/V_A^0)100\%$ . С этой точки зрения термодинамический подход, построенный в рамках СЛР на разумном сочетании унитарной шкалы сольвомолярностей с рациональным способом расчета  $V_A^0$  и  $v_{AA}(\equiv S_V)$ , представляется более обоснованным. К тому же, учитывая наличие корреляции между свойствами в системах Льюиса-Ренделла (СЛР) и МакМиллана-Майера

(СММ) [34, 35, 37, 43], основные «нюансы» парного взаимодействия между молекулами растворенного неэлектролита, находящие свое отражение в параметрах  $v_{AA}$ , сохраняются при переходе ко второму вириальному коэффициенту  $B_{AA}$  (имеющему, как известно, размерность  $V_A^0$ ) [35]. Последний, в свою очередь, непосредственно связан с подынтегральной функцией  $\omega_{AA}$  – потенциалом средней силы взаимодействия в СММ [35, 43].

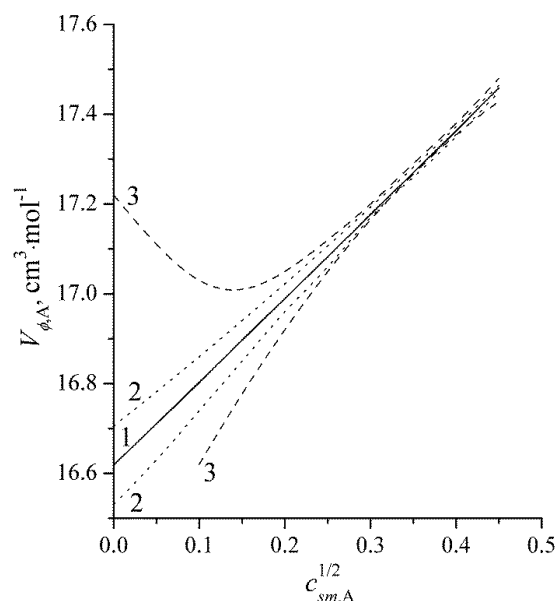


Рис. Зависимость  $V_{\phi,A}$  и  $\pm\delta V_{\phi,A}$  от  $\sqrt{c_{sm}}$  для растворов NaCl в воде при 298,15 К [38]: 1 – линия, отвечающая предельному закону Дебая-Хюккеля (с наклоном  $\Delta v = 1,87$ ); 2 – интервал погрешностей при обработке с помощью рациональной процедуры; 3 – «коридор» ошибок при обработке традиционным (экстраполяционным) способом

Fig. The  $V_{\phi,A}$  and  $\pm\delta V_{\phi,A}$  values as a function of  $\sqrt{c_{sm}}$  for aqueous NaCl solutions at 298.15 K [38]: 1 – the line predicted by the Debye-Hückel limit law (with a slope of  $\Delta v = 1.87$ ); 2 – the interval of fitting errors when the rational procedure is used; 3 – the “corridor” of fitting errors when the traditional (extrapolation) method is used

В заключение заметим, что понятие сольвомолярности  $c_{sm}$  можно рассматривать в качестве более общего определения введенного ранее в научный лексикон термина «аквамолярность»  $c_{aqm}$  (см. [45] и ссылки там же). Шкала  $c_{aqm}$ , с момента ее появления в химической литературе, используется *исключительно* для обозначения концентрации раствора с веществом А в тяжелой воде ( $D_2O$ ) при сравнении термодинамических эффектов растворения (сольватации) А в Н/Д-изотопологах воды. Поэтому не следует искать каких-либо аналогий или противоречий при употреблении понятий *сольвомолярность* и *аквамолярность* в случае интерпретации термодинамических эффектов растворения и сольватации.

## ПОСЛЕСЛОВИЕ

Как уже отмечалось выше, научное и «методологическое» содержание данного сообщения следует рассматривать в контексте той роли, которую сыграли организаторские способности и научные достижения Г.А. Крестова в деле создания собственной «растворной» школы» на базе ИХТИ – ИГХТУ, впоследствии (сорок лет назад) переросшей в академическую, благодаря основанию ИХНР АН СССР – ИХР РАН. Обращаясь к знаменательной годовщине со дня рождения Г.А. Крестова, нельзя не отметить тот вклад, который внесли его труды и новаторские идеи в создание и творческое развитие общепризнанного научного направления по изучению структурно-термодинамических характеристик растворения и сольватации в жидких средах различной химической природы. Одним из ключевых этапов такого рода исследований явилась разработка концепции сольвомолярности ( $c_{sm}$ ) как рационального способа выражения концентрации, о значении которого в физикохимии растворов и шла речь в данном сообщении.

Проведенные за прошедшие годы исследования продемонстрировали логичность и продуктивность применения шкалы сольвомолярностей при изучении процессов растворения и сольвата-

ции, в том числе в растворителях с межмолекулярной водородной связью. Важным аспектом в разработке и обосновании преимуществ шкалы  $c_{sm}$  перед другими («традиционными») явилось плодотворное сотрудничество Г.А. Крестова с одним из его первых учеников и соратников – В.К. Абросимовым (которому совсем недавно исполнилось бы 80 лет). За тридцатилетний период их совместной работы, с момента первой публикации в «Журнале структурной химии» в 1964 году [45], были всесторонне обоснованы многие положения теории растворов и получило развитие такое уникальное направление, как «Термодинамика изотопных эффектов процессов в растворах».

К сожалению, к началу нулевых годов нашего столетия как в ИХР РАН, так и в ИГХТУ, были практически свернуты работы по исследованию растворимости газов в жидких средах, служившие экспериментальной и концептуальной основой для обоснования шкалы сольвомолярностей. Тем не менее, как наглядно продемонстрировано выше, рассматриваемый способ выражения концентрации остается востребованным и на современном этапе развития физикохимии растворов в структурно-термодинамическом аспекте приложения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Крестов Г.А.** Термодинамическая характеристика структурных изменений воды, связанных с гидратацией ионов. *Журн. структ. химии*. 1962. Т. 3. № 2. С. 137-142.
2. **Krestov G.A.** Thermodynamics of Solvation: Solution and Dissolution, Ions and Solvents, Structure and Energetics. New York: Ellis Horwood Ltd. 1991. 284 p. DOI: 10.1002/bbpc.19910951159.
3. **Абросимов В.К., Крестов Ал.Г.** Концепция структурно-термодинамических характеристик сольватации в термодинамике растворов. В кн.: Достижения и проблемы теории сольватации. Структурно-термодинамические аспекты. Отв. ред. А.М. Кутепов. (Серия «Проблемы химии растворов»). М.: Наука. 1998. С. 5-20.
4. **Абросимов В.К.** Развитие физической химии жидких растворов в трудах отечественных ученых. (Научные школы К.П. Мищенко, Н.А. Измайлова, О.Я. Самойлова, Г.А. Крестова). *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2008. Т. 51. Вып. 9. С. 5-10.
5. Крестов Геннадий Алексеевич. Библиографический указатель научных трудов. Сост.: О.Л. Лосенкова, Л.В. Савинова, И.А. Шишкович. Отв. ред. А.В. Агафонов. Иваново: ИХНР РАН. 1992. 146 с.
6. Крестов Геннадий Алексеевич (1931-1994). Библиографический указатель. Сост.: А.Г. Захаров, Е.В. Румянцев, В.В. Ганюшкина. Отв. ред. О.И. Койфман. (Серия «Золотой фонд Химтех»). Иваново: ИГХТУ. 2011. 194 с.
7. **Койфман О.И., Ганюшкина В.В., Малясова А.С.** Научные школы Ивановского Химтех: сквозь призму истории. Иваново: ФГБОУ ВО «ИГХТУ». 2020. 496 с.

## REFERENCES

1. **Krestov G.A.** The thermodynamic characteristics of structural changes in water accompanying the hydration of ions. *J. Struct. Chem.* 1962. V. 3. N 2. P. 125-130. DOI: 10.1007/BF00746129.
2. **Krestov G.A.** Thermodynamics of Solvation: Solution and Dissolution, Ions and Solvents, Structure and Energetics. New York: Ellis Horwood Ltd. 1991. 284 p. DOI: 10.1002/bbpc.19910951159.
3. **Abrosimov V.K., Krestov Al.G.** The conception of structural-thermodynamic properties of solvation in solution thermodynamics. In: Achievements and Problems of the Solvation Theory. Structural and Thermodynamic Aspects. Ed. by A.M. Kutepov. ("Problems of the Solution Chemistry" Series). M.: Nauka. 1998. P. 5-20 (in Russian).
4. **Abrosimov V.K.** Development of physical chemistry of liquid solutions in the works of our scientists. (Scientific schools of K.P. Mishchenko, N.A. Izmailov, O.Ya. Samoilov, G.A. Krestov). *ChemChemTech.[Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2008. V. 51. N 9. P. 5-10 (in Russian).
5. Gennady Alekseevich Krestov. The Bibliography of Scientific Works. Compiled by O.L. Losenkova, L.V. Savinova, I.A. Shishkovich. Ed. by A.V. Agafonov. Ivanovo: IKhNR RAN. 1992. 146 p. (in Russian).
6. Krestov Gennady Alekseevich (1931-1994). Bibliographic Index. Compiled by A.G. Zakharov, E.V. Romyantsev, V.V. Ganyushkina. Ed. by O.I. Koifman. (The "Gold Fund of ChemTech" Series). Ivanovo: IGKhTU. 2011. 194 p. (in Russian).

8. **Крестов Г.А., Абросимов В.К.** Термодинамическая характеристика растворения газообразных и твердых веществ из данных по растворимости. Термодинамика и строение растворов. Межвуз. сб. Иваново: ИХТИ. 1976. Вып. 3. С. 13-21.
9. Владимир Ксенофонтович Абросимов (1940-2015). Библиографический указатель. Сост.: Е.В. Иванов, Л.С. Ефремова. Под. общ. ред. А.Г. Захарова. Иваново: АО «Ивановский издательский дом». 2016. 72 с.
10. **Иванов Е.В., Абросимов В.К.** К вопросу о влиянии H/D-обмена на изотопные эффекты растворителя в термодинамических (энтальпийных) характеристиках сольватации протонодонорных неэлектролитов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2016. Т. 59. Вып. 6. С. 8-15.
11. **Абросимов В.К., Страхов А.Н., Крестов Г.А.** Проявление структуры воды различной степени дейтерированности в термодинамических характеристиках растворения He, Ne и Ar при 273–353 К. *Журн. структ. химии.* 1976. Т. 17. № 6. С. 1027-1035.
12. **Абросимов В.К., Крестов Г.А.** Некоторые вопросы выбора концентрационной шкалы для выражения растворимости неполярных газов в жидкостях. Термодинамика и строение растворов. Межвуз. сб. Иваново: ИХТИ. 1977. Вып. 6. С. 150-155.
13. **Крестов Г.А., Виноградов В.И., Кесслер Ю.М., Абросимов В.К., Колкер А.М., Мишустин А.И., Пирогов А.И.** Современные проблемы химии растворов. Отв. ред. Б.Д. Березин. М.: Наука. 1986. 264 с.
14. **Иванов Е.В., Абросимов В.К.** Насыщенные водные растворы неполярных газов. В кн.: Концентрированные и насыщенные растворы. Отв. ред. А.М. Кутепова. (Серия «Проблемы химии растворов»). М.: Наука. 2002. С. 314-415.
15. **Clever H.L., Battino R.** Solubility of gases in liquids. In.: *The Experimental Determination of Solubilities.* V. 6. Eds by G.T. Hefter, R.P.T. Tomkins. Chichester (UK): John Wiley. 2003. P. 99-150. DOI: 10.1002/0470867833.ch3.
16. **Абросимов В.К., Иванов Е.В.** Денсиметрия растворов. В кн.: Теоретические и экспериментальные методы химии растворов. Отв. ред. А.Ю. Цивадзе. (Серия «Проблемы химии растворов»). М.: Проспект. 2011. С. 425-463.
17. **Абросимов В.К., Страхов А.Н.** Методы измерения растворимости газов в жидкостях. В кн.: Экспериментальные методы химии растворов: Денсиметрия, вискозиметрия, кондуктометрия и другие методы. Отв. ред. А.М. Кутепова. (Серия «Проблемы химии растворов»). М.: Наука. 1998. С. 215-255.
18. **Иванов Е.В., Абросимов В.К., Иванова Н.Г., Лебедева Е.Ю.** Дифференцирующее влияние H/D-изотопного замещения и температуры на структурные эффекты сольватации благородных газов в метанольных растворах. *Докл. Акад. наук.* 2002. Т. 386. № 5. С. 636-640.
19. **Иванов Е.В., Лебедева Е.Ю., Абросимов В.К., Иванова Н.Г.** Структурный вклад эффекта гидрофобной гидратации благородных газов. *Журн. структ. химии.* 2005. Т. 46. № 2. С. 262-272.
20. **Железняк Н.И.** Влияние молекул гексаметилфосфортриамина на структуру воды. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2017. Т. 60. Вып. 10. С. 36-41.
21. **Абросимов В.К., Чумакова Р.В.** Межчастичные взаимодействия в системах аргон – вода – аминокислоты. *Журн. физ. химии.* 1998. Т. 72. № 6. С. 994-997.
22. **Баделин В.Г., Абросимов В.К.** Изотопные эффекты в межчастичных взаимодействиях в системах аргон – электролит – вода. *Журн. физ. химии.* 2000. Т. 74. № 3. С. 418-421.
7. **Koifman O.I., Ganyushkina V.V., Malysova A.S.** Scientific Schools of the Ivanovo's ChemTech: Through the Prism of History. Ivanovo: FGBOU VO "IGKhTU". 2020. 496 p. (in Russian).
8. **Krestov G.A., Abrosimov V.K.** Thermodynamic characteristics of the dissolution of gaseous and solid substances from the solubility data. *Thermodynamics and structure of solutions.* Inter-Univ. Coll. Sci. Pap. Ivanovo: IKhTI. 1976. N 3. P. 13-21 (in Russian).
9. Vladimir Ksenofontovich Abrosimov (1940-2015). *Bibliographic Index.* Compiled by E.V. Ivanov, L.S. Efremova. Ed. by A.G. Zakharov. Ivanovo: AO "Ivanovskiy Izdatel'skiy Dom" (IID). 2016. 72 p. (in Russian).
10. **Ivanov E.V., Abrosimov V.K.** On influence of H/D exchange on solvent isotope effects in thermodynamic (enthalpic) characteristics of solvation of proton-donating non-electrolytes. *ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2016. V. 59. N 6. P. 8-15 (in Russian).
11. **Abrosimov V.K., Strakhov A.N., Krestov G.A.** Manifestation of the structure of water with different degrees of deuteration in the thermodynamic characteristics of the dissolution of He, Ne, and Ar at 273–353 K. *J. Struct. Chem.* 1976. V. 17. N 6. P. 877-884. DOI: 10.1007/BF00746230.
12. **Abrosimov V.K., Krestov G.A.** Some questions of the choice of the concentration scale for expressing the solubility of non-polar gases in liquids. *Thermodynamics and structure of solutions.* Inter-Univ. Coll. Sci. Pap. Ivanovo: IKhTI. 1977. N 6. P. 150-155 (in Russian).
13. **Krestov G.A., Vinogradov V.I., Kessler Yu.M., Abrosimov V.K., Kolker A.M., Mishustin A.I., Pirogov A.I.** Modern Problems of the Solution Chemistry. Ed. by B.D. Berезin. М.: Nauka. 1986. 264 p. (in Russian).
14. **Ivanov E.V., Abrosimov V.K.** Saturated aqueous solutions of nonpolar gases. In: *Concentrated and Saturated Solutions.* Ed. by A.M. Kutepov. ("Problems of Solution Chemistry" Series). М.: Nauka. 2002. P. 314-415 (in Russian).
15. **Clever H.L., Battino R.** Solubility of gases in liquids. In.: *The Experimental Determination of Solubilities.* V. 6. Eds by G.T. Hefter, R.P.T. Tomkins. Chichester (UK): John Wiley. 2003. P. 99-150. DOI: 10.1002/0470867833.ch3.
16. **Abrosimov V.K., Ivanov E.V.** The solution densimetry. In: *Theoretical and Experimental Methods of the Solution Chemistry.* Ed. by A.Yu. Tsivadze ("Problems of Solution Chemistry" Series). М.: Prospect. 2011. P. 425-463 (in Russian).
17. **Abrosimov V.K., Strakhov A.N.** Methods for measuring the solubility of gases in liquids. In: *Experimental Methods of Solution Chemistry: Densimetry, Viscosimetry, Conductometry and Other Methods.* Ed. by A.M. Kutepov. ("Problems of Solution Chemistry" Series). М.: Nauka. 1998. P. 215-255 (in Russian).
18. **Ivanov E.V., Abrosimov V.K., Ivanova N.G., Lebedeva E.Yu.** Differentiating effect of H/D isotope substitution and temperature on structural effects of solvation of inert gases in methanol solutions. *Doklady Phys. Chem.* 2002. V. 386. N 4-6. P. 242-246. DOI: 10.1023/A:1020746931813.
19. **Ivanov E.V., Lebedeva E.J., Abrosimov V.K., Ivanova N.G.** Structural contribution to the effect of hydrophobic hydration of noble gases. *J. Struct. Chem.* 2005. V. 46. N 2. P. 253-263. DOI: 10.1007/s10947-006-0039-8.
20. **Zheleznyak N.I.** Influence of hexamethylphosphotriamide molecules on water structure. *ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2017. V. 60. N 10. P. 36-41 (in Russian). DOI: 106060/tcct.20176010.5633.
21. **Abrosimov V.K., Chumakova R.V.** Interparticle interactions in the argon – water – amino acid systems. *Zh. Fiz. Khim.* 1998. V. 72. N 6. P. 994-997 (in Russian).



23. **Абросимов В.К., Иванов Е.В., Иванова Н.Г.** Растворимость криптона в растворах бромидов калия и тетра-*n*-бутиламмония в изотопомерах метанола при различных температурах. *Журн. физ. химии*. 2004. Т. 78. № 5. С. 861-867.
24. Nitrogen and Air. Ed. by R. Battino. (IUPAC Solubility Data Series. V. 10). Oxford – New York: Pergamon Press. 1982. P. XVIII, XXXI.
25. Argon. Ed. by H.L. Clever. (IUPAC Solubility Data Series. V. 4). Oxford – New York: Pergamon Press. 1980. P. 33.
26. **Ewing M.B., Lilley T.H., Olofsson G.M., Ratzsch M.T., Somsen G.** Standard quantities in chemical thermodynamics. Fugacities, activities and equilibrium constants for pure and mixed phases (IUPAC Recommendations 1994). *Pure Appl. Chem.* 1994. V. 66. N 3. P.533-552. DOI: 10.1351/pac199466030533.
27. **Lorimer J.W.** Quantities, units and conversions. In: The Experimental Determination of Solubilities. Eds by G.T. Hefter, R.P.T. Tomkins. Chichester (UK): John Wiley. 2003. P. 1-15. DOI: 10.1002/0470867833.ch0.
28. **Gamsjäger H., Lorimer J.W., Scharlin P., Shaw D.G.** Glossary of terms related to solubility (IUPAC Recommendations 2008). *Pure Appl. Chem.* 2008. V. 80. N 2. P. 233-276. DOI: 10.1351/pac200880020233.
29. **Иванов Е.В., Абросимов В.К., Лебедева Е.Ю.** Объемные свойства H<sub>2</sub>O, D<sub>2</sub>O и метанола в ацетонитриле при 278.15–318.15 К. *Изв. Акад. наук. Сер. хим.* 2003. № 6. С. 1254-1260.
30. **Иванов Е.В., Абросимов В.К.** Объемные свойства стехиометрической смеси ионов K<sup>+</sup> и Br<sup>-</sup> в H/D-изотопозамещенных водно-метанольных растворах при 278.15–318.15 К: II. Системы H<sub>2</sub>O–CD<sub>3</sub>OH–KBr и D<sub>2</sub>O–CH<sub>3</sub>OD–KBr. *Журн. неорг. химии*. 2006. Т. 51. № 5. С. 895-901.
31. **Рамазанова А.Г., Королев В.В., Иванов Е.В.** Объемные свойства растворов олеиновой, линолевой и линоленовой кислот в циклогексане и бензоле. *Журн. физ. химии*. 2007. Т. 81. № 4. С. 655-659.
32. **Ivanov E.V.** Volumetric properties of dilute solutions of water in ethanol and water-*d*<sub>2</sub> in ethanol-*d*<sub>1</sub> between *T* = (278.15 and 318.15) K. *J. Chem. Thermodyn.* 2012. V. 47. P. 162-170. DOI: 10.1016/j.jct.2011.10.009.
33. **Ivanov E.V., Abrosimov V.K., Lebedeva E.Yu.** Apparent molar volumes and expansibilities of H<sub>2</sub>O and D<sub>2</sub>O in N,N-dimethylformamide and N,N-dimethylacetamide in the range of *T* = (278.15 to 318.15) K at *p* = 0.1 MPa: A comparative analysis. *J. Chem. Thermodyn.* 2012. V. 53. P. 131-139. DOI: 10.1016/j.jct.2012.04.007.
34. **Friedman H.L.** Lewis-Randall to McMillan-Mayer conversion for the thermodynamic excess functions of solutions. Part II. Excess energy and volume. *J. Solut. Chem.* 1972. V. 1. N 5. P. 413-417. DOI: 10.1007/BF00645604.
35. **Кустов А.В.** Гидрофобные эффекты: Структурные, термодинамические, прикладные аспекты. Достижения последних лет. М.: КРАСАНД. 2013. 224 с.
36. **Atkins P.W., Julio P., Keeler J.** Atkins' Physical Chemistry. 11th ed. Oxford: The Oxford University Press, 2018. 1040 p.
37. **Blokzijl W., Engberts J.B.F.N.** Hydrophobic effects. Opinions and facts. *Angew. Chem. Int., Ed. Engl.* 1993. V. 32. N 11. P. 1545-1579. DOI: 10.1002/anie.199315451.
38. **Абросимов В.К., Королев В.В.** Денсиметрия. В кн.: Экспериментальные методы химии растворов: Денсиметрия, вискозиметрия, кондуктометрия и другие методы. Отв. ред. А.М. Кутепов. (Серия «Проблемы химии растворов»). М.: Наука. 1997. С. 5-45.
22. **Badelin V.G., Abrosimov V.K.** Isotope effects on interparticle interactions in the argon – electrolyte – water systems. *Zh. Fiz. Khim.* 2000. V. 74. N 3. P. 418-421 (in Russian).
23. **Abrosimov V.K., Ivanov E.V., Ivanova N.G.** Solubility of krypton in solutions of potassium and tetra-*n*-butylammonium bromides in isotopomers of methanol at various temperatures. *Russ. J. Phys. Chem.* 2004. V. 78. N 5. P. 741-746.
24. Nitrogen and Air. Ed. by R. Battino. (IUPAC Solubility Data Series. V. 10). Oxford – New York: Pergamon Press. 1982. P. XVIII, XXXI.
25. Argon. Ed. by H.L. Clever. (IUPAC Solubility Data Series. V. 4). Oxford – New York: Pergamon Press. 1980. P. 33.
26. **Ewing M.B., Lilley T.H., Olofsson G.M., Ratzsch M.T., Somsen G.** Standard quantities in chemical thermodynamics. Fugacities, activities and equilibrium constants for pure and mixed phases (IUPAC Recommendations 1994). *Pure Appl. Chem.* 1994. V. 66. N 3. P.533-552. DOI: 10.1351/pac199466030533.
27. **Lorimer J.W.** Quantities, units and conversions. In: The Experimental Determination of Solubilities. Eds by G.T. Hefter, R.P.T. Tomkins. Chichester (UK): John Wiley. 2003. P. 1-15. DOI: 10.1002/0470867833.ch0.
28. **Gamsjäger H., Lorimer J.W., Scharlin P., Shaw D.G.** Glossary of terms related to solubility (IUPAC Recommendations 2008). *Pure Appl. Chem.* 2008. V. 80. N 2. P. 233-276. DOI: 10.1351/pac200880020233.
29. **Ivanov E.V., Abrosimov V.K., Lebedeva E.Yu.** Volumetric properties of H<sub>2</sub>O, D<sub>2</sub>O, and methanol in acetonitrile at 278.15–318.15 K. *Russ. Chem. Bull., Int. Ed.* 2003. V. 52. N 6. P. 1326-1332. DOI: 10.1023/A:1024866825233.
30. **Ivanov E.V., Abrosimov V.K.** Volumetric properties of a stoichiometric mixture of K<sup>+</sup> and Br<sup>-</sup> ions in H/D isotope-substituted aqueous-methanolic solutions between 278.15 and 318.15 K: II. H<sub>2</sub>O–CD<sub>3</sub>OH–KBr and D<sub>2</sub>O–CH<sub>3</sub>OD–KBr systems. *Russ. J. Inorg. Chem.* 2006. V. 51. N 5. P. 829-835. DOI: 10.1134/S0036023606050251.
31. **Ramazanova A.G., Korolev V.V., Ivanov E.V.** Limiting partial molar volumes of solutions of oleic, linoleic, and linolenic acids in cyclohexane and benzene. *Russ. J. Phys. Chem. A* 2007. V. 81. N 4. P. 560-564. DOI: 10.1134/S0036024407040103.
32. **Ivanov E.V.** Volumetric properties of dilute solutions of water in ethanol and water-*d*<sub>2</sub> in ethanol-*d*<sub>1</sub> between *T* = (278.15 and 318.15) K. *J. Chem. Thermodyn.* 2012. V. 47. P. 162-170. DOI: 10.1016/j.jct.2011.10.009.
33. **Ivanov E.V., Abrosimov V.K., Lebedeva E.Yu.** Apparent molar volumes and expansibilities of H<sub>2</sub>O and D<sub>2</sub>O in N,N-dimethylformamide and N,N-dimethylacetamide in the range of *T* = (278.15 to 318.15) K at *p* = 0.1 MPa: A comparative analysis. *J. Chem. Thermodyn.* 2012. V. 53. P. 131-139. DOI: 10.1016/j.jct.2012.04.007.
34. **Friedman H.L.** Lewis-Randall to McMillan-Mayer conversion for the thermodynamic excess functions of solutions. Part II. Excess energy and volume. *J. Solut. Chem.* 1972. V. 1. N 5. P. 413-417. DOI: 10.1007/BF00645604.
35. **Kustov A.V.** Hydrophobic Effects: Structural, Thermodynamic, and Applied Aspects. Achievements of Last Years. М.: КРАСАНД. 2013. 224 p. (in Russian).
36. **Atkins P.W., Julio P., Keeler J.** Atkins' Physical Chemistry. 11th ed. Oxford: The Oxford University Press, 2018. 1040 p.
37. **Blokzijl W., Engberts J.B.F.N.** Hydrophobic effects. Opinions and facts. *Angew. Chem. Int., Ed. Engl.* 1993. V. 32. N 11. P. 1545-1579. DOI: 10.1002/anie.199315451.

39. **Абросимов В.К.** Неэкстраполяционный способ определения парциальных молярных объемов и изэнтропийных сжимаемостей при бесконечном разбавлении. *Журн. физ. химии*. 1988. Т. 62. № 7. С. 1913-1916.
40. **Würzburger S., Sartorio R., Guarino V., Nisi M.** Volumetric properties of aqueous solutions of polyols between 0.5 and 25°C. *J. Chem. Soc. Faraday Trans. 1*. 1988. V. 84. N 7. P. 2279-2287. DOI: 10.1039/F19888402279.
41. **Wawer J., Krakowiak J.** The interpretation of the parameters of the equation used for the extrapolation of apparent molar volumes of the non-electrolyte (solutes) to the infinite dilution. *J. Mol. Liq.* 2019. V. 296. P. 111765/1-111765/2. DOI: 10.1016/j.molliq.111765.
42. **Ivanov E.V.** Note on “The interpretation of the parameters of the equation used for the extrapolation of apparent molar volumes of the non-electrolyte (solutes) to the infinite dilution” by J. Wawer and J. Krakowiak [J. Mol. Liq. 296 (2019) 111765]. *J. Mol. Liq.* 2020. V. 314. P. 113637/1-113637/3. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.113637.
43. **Ivanov E.V., Kustov A.V., Batov D.V., Smirnova N.L., Pechnikova N.L.** Thermodynamics of tetramethylurea solutions in ethylene glycol: The evidence of pairwise solvophobic interaction. *J. Mol. Liq.* 2020. V. 317. P. 113994/1-113994/7. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.113994.
44. **Ansari M.S., Hafiz-ur-Rehman.** Aquamolality: a useful concentration unit. *Phys. Chem. Liq.: Int. J.* 2014. V. 49. N 6. P. 743-745. DOI: 10.1080/00319104.2010.509723.
45. **Крестов Г.А., Абросимов В.К.** Термодинамическая характеристика связанных с гидратацией ионов структурных изменений воды при различных температурах. *Журн. структ. химии*. 1964. Т. 5. № 4. С. 510-516.
38. **Abrosimov V.K., Korolev V.V.** Densimetry. In: *Experimental Methods of Solution Chemistry: Densimetry, Viscometry, Conductometry and Other Methods*. Ed. by A.M. Kutepov. (“Problems of Solution Chemistry” Series). M.: Nauka. 1997. P. 5-45 (in Russian).
39. **Abrosimov V.K.** Non-extrapolating method for determination of partial molar volumes and isentropic compressibilities at infinite dilution. *Zh. Fiz. Khim.* 1988. V. 62. N 7. P. 1913-1916 (in Russian).
40. **Würzburger S., Sartorio R., Guarino V., Nisi M.** Volumetric properties of aqueous solutions of polyols between 0.5 and 25°C. *J. Chem. Soc. Faraday Trans. 1*. 1988. V. 84. N 7. P. 2279-2287. DOI: 10.1039/F19888402279.
41. **Wawer J., Krakowiak J.** The interpretation of the parameters of the equation used for the extrapolation of apparent molar volumes of the non-electrolyte (solutes) to the infinite dilution. *J. Mol. Liq.* 2019. V. 296. P. 111765/1-111765/2. DOI: 10.1016/j.molliq.111765.
42. **Ivanov E.V.** Note on “The interpretation of the parameters of the equation used for the extrapolation of apparent molar volumes of the non-electrolyte (solutes) to the infinite dilution” by J. Wawer and J. Krakowiak [J. Mol. Liq. 296 (2019) 111765]. *J. Mol. Liq.* 2020. V. 314. P. 113637/1-113637/3. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.113637.
43. **Ivanov E.V., Kustov A.V., Batov D.V., Smirnova N.L., Pechnikova N.L.** Thermodynamics of tetramethylurea solutions in ethylene glycol: The evidence of pairwise solvophobic interaction. *J. Mol. Liq.* 2020. V. 317. P. 113994/1-113994/7. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.113994.
44. **Ansari M.S., Hafiz-ur-Rehman.** Aquamolality: a useful concentration unit. *Phys. Chem. Liq.: Int. J.* 2014. V. 49. N 6. P. 743-745. DOI: 10.1080/00319104.2010.509723.
45. **Krestov G.A., Abrosimov V.K.** Thermodynamic characteristic of the structural changes in water and their relation to ion hydration at various temperatures. *J. Struct. Chem.* 1964. V. 5. N 4. P. 471-476. DOI: 10.1007/BF00743702.

Поступила в редакцию Received 07.06.2021

Принята к опубликованию Accepted 10.08.2021

Received 07.06.2021

Accepted 10.08.2021