

# ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

УДК 535.33 + 543.422 + 541.57 + 541.65

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТОДОМ ИК СПЕКТРОСКОПИИ ЧИСЛА РАЗНЫХ ГЕТЕРОАССОЦИАТОВ В РАСТВОРЕ HF–ОРГАНИЧЕСКИЙ РАСТВОРИТЕЛЬ

© 2010 г. Г. В. Юхневич\*, доктор физ.-мат. наук; Е. Г. Тараканова\*, канд. физ.-мат. наук;  
И. В. Быков\*\*

\* Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва

E-mail: gvyukhn@igic.ras.ru

\*\* Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, Москва

E-mail: nanocom@yandex.ru

Предложен и опробован на примере трех двойных жидких систем – HF–(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>CO, HF–CH<sub>3</sub>CN и HF–HCON(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> – простой способ обнаружения в растворе прочных гетероассоциатов (ГА) и определения числа различных их типов. Лежащий в его основе анализ изменения с концентрацией раствора частот колебаний кратных связей молекул растворителя (Solv) показал, что спектральным проявлением образования ГА разного состава являются заметные смещения (примерно на 15–170 см<sup>-1</sup>) полосы CO(CN)-колебания. Если форма этого колебания при переходе молекулы Solv из чистого растворителя в состав разных типов ассоциатов остается примерно постоянной, то отвечающие им частотные сдвиги имеют один и тот же знак. Изменение формы анализируемого колебания при вхождении молекулы растворителя в какой-либо из гетерокомплексов может привести к инверсии этого знака.

*Ключевые слова:* ИК спектроскопия, двойная жидкая система, водородная связь, гетероассоциаты, фтористый водород, органический растворитель.

Коды OCIS: 300.0300, 300.6340.

Поступила в редакцию 05.11.2009.

### Введение

Одним из актуальных направлений исследования систем, содержащих фтористый водород, является получение данных о составе и особенностях строения само- и гетероассоциатов (ГА), включающих молекулы HF. При экспериментальном изучении таких молекулярных комплексов, образующихся в твердой, жидкой и газовой фазах, используют методы ЯМР, физико-химического, дифференциально-термического и рентгеноструктурного анализов (см., например, [1–4]), а также – наиболее активно – метод колебательной спектроскопии [5–19].

При растворении фтористого водорода в органических растворителях (Solv) образуются прочные Н-связанные ГА, во многом определяющие реакционную способность и физико-химические свойства содержащих их систем [5, 13–19]. Для нахождения стехиометрических соотношений HF:Solv в таких ассоциатах разработаны две

методики, адекватные закону действующих масс [2, 13]. Они основаны на анализе результатов измерения в широком диапазоне концентраций двух характеристик двойных жидких систем (ДЖС) – нормированной избыточной плотности раствора ( $\Delta d/N$ , г/моль) [2] и его нормированной оптической плотности ( $D/N$ ) на частотах колебаний молекулярных комплексов [13]. В обоих случаях нормировка проводится на суммарное число молей компонентов ДЖС в 1 л, так что, по закону действующих масс [20], максимумы кривых зависимостей  $\Delta d/N$  и  $D/N$  от концентрации раствора наблюдаются при мольном соотношении его компонентов, соответствующем стехиометрическому составу ГА.

Применение указанных методик при исследовании восьми ДЖС HF–Solv (HCONH<sub>2</sub>, HCON(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CO, (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>CO, (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>O, CH<sub>3</sub>OH, CH<sub>3</sub>CN, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>N) показало, что при растворении фтористого водорода в органических растворителях может образовываться до четы-

рех различных типов ГА, в которых на одну молекулу Solv приходится от 1/2 до 12 молекул HF (см., например, [14–16, 18]), и позволило, опираясь на результаты соответствующих квантово-химических расчетов, установить строение некоторых из обнаруженных ассоциатов [16–17]. Однако методики определения стехиометрических соотношений HF:Solv [2, 13], дающие сведения и о числе доминирующих в системе ГА разного состава, весьма длительны и трудоемки. Достаточно сказать, что при спектроскопическом исследовании для проведения нормировки оптической плотности растворов разных концентраций необходимо измерить также их гравиметрическую плотность. В то же время для постановки и решения ряда задач желательнее иметь возможность с минимальными затратами времени и сил узнать, образуются ли в данном растворе ГА, и оценить число разных их типов.

Для обеспечения такой возможности в настоящей работе предложен относительно простой способ обнаружения прочных гетерокомплексов. Он основан на анализе изменения (в зависимости от концентрации раствора) положения узких (порядка 15–40  $\text{см}^{-1}$ ) интенсивных полос колебаний молекул растворителя в тех небольших частотных интервалах, в которых поглощение кислоты представляет собой слабо меняющийся фон. Такая ситуация реализуется при наличии в молекулах Solv кратных связей CO или CN.

Правомерность данной методики обусловлена тем, что частотные сдвиги полос  $\nu_{\text{CO}}$  и  $\nu_{\text{CN}}$ , обусловленные переходом молекулы растворителя в состав ассоциата, должны быть значительными (порядка 10–100  $\text{см}^{-1}$ ), так как все образующиеся в ДЖС HF-Solv молекулярные комплексы содержат сильные Н-связи. Доказательством этого служат большие (достигающие 1600  $\text{см}^{-1}$ ) низкочастотные смещения (относительно максимума полосы поглощения жидкого фтористого водорода) полос валентных колебаний молекул HF, входящих в состав ГА [5, 13–19], и заметное увеличение реальной плотности раствора HF-Solv по сравнению с аддитивной [2, 13–15, 18].

Предложенный способ обнаружения в растворе ГА и определения числа различных их типов был опробован на примере трех ДЖС: HF-(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>CO, HF-CH<sub>3</sub>CN и HF-HCON(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. Выбор именно этих систем в качестве объектов исследования сделан на основании полученных ранее результатов [18, 16, 19], согласно которым в каждой из них образуется по три типа ГА – со

стехиометрическими соотношениями молекул 1:1, 4:1 и примерно 10(12):1. При этом взаимное расположение полос в ИК спектрах всех указанных растворов таково, что позволяет однозначно зафиксировать смещения частот интенсивных колебаний ( $\nu_{\text{CO}}$  или  $\nu_{\text{CN}}$ ) молекул растворителя при вхождении их в состав ГА разной топологии.

## Результаты и обсуждение

В настоящем исследовании проанализированы полные серии спектров ДЖС HF-(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>CO, HF-CH<sub>3</sub>CN и HF-HCON(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, которые были впервые измерены и использованы при нахождении стехиометрических соотношений HF:Solv в работах [18, 13]. Однако на рис. 1–3 приведены данные об оптической плотности лишь тех растворов, которые позволяют наиболее наглядно проиллюстрировать происходящие с повышением содержания HF последовательные изменения огибающей полос поглощения в области валентных колебаний CO- или CN-групп молекул растворителей.

Так, на рис. 1 приведены спектры оптической плотности диэтилкетона и шести растворов HF-(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>CO, концентрации которых лежат в диапазоне от 1:2 до 12:1. Из представленных данных видно, что интенсивность полосы  $\nu_{\text{CO}}$  (1716  $\text{см}^{-1}$ ) молекул (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>CO, не входящих в состав ГА, с ростом содержания HF в растворе быстро уменьшается. При этом одна за другой, с нарастающим низкочастотным сдвигом, сопровождающимся соответствующей “перекач-

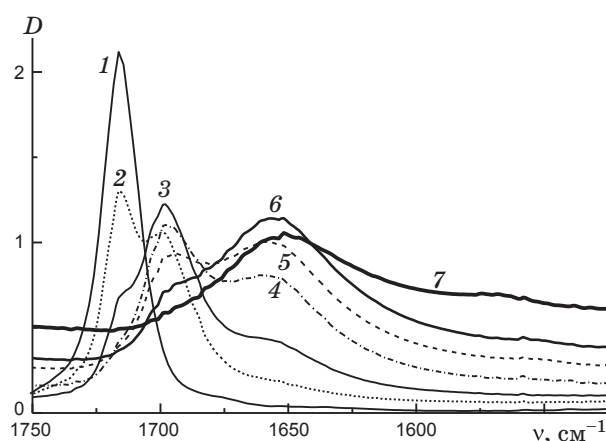


Рис. 1. Спектры оптической плотности диэтилкетона (1) и растворов HF-(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>CO с мольным соотношением компонентов 1:2 (2), 1:1 (3), 2:1 (4), 3:1 (5), 4:1 (6) и 12:1 (7).

кой” интенсивности, в спектре появляются полосы  $\nu_{CO}$ , обусловленные колебаниями молекул  $(C_2H_5)_2CO$ , входящих в состав трех разных гетерокомплексов.

Первая из этих полос –  $1698\text{ см}^{-1}$ , проявляющаяся в виде небольшого перегиба на крыле полосы  $1716\text{ см}^{-1}$  уже в спектре раствора 1:12, достигает наибольшей интенсивности при мольном соотношении компонентов 1:1 и практически исчезает при соотношении 8:1 (рис. 1 не содержит данных об оптической плотности бинарных смесей 1:12 и 8:1). Вторая полоса –  $1653 \pm 5\text{ см}^{-1}$  – наблюдается в спектрах всех растворов, начиная с состава 1:2. Поскольку она сильно перекрывается с первой, частоту ее максимума можно оценить лишь приближенно, а отношение  $HF:(C_2H_5)_2CO$ , при котором ее пиковая интенсивность максимальна, составляет 4:1. Интенсивность третьей, слабой и широкой полосы  $\nu \approx 1550\text{ см}^{-1}$ , отстоящей от второй примерно на  $100\text{ см}^{-1}$  и наблюдаемой в спектрах растворов  $\geq 2:1$  (это четко видно при изменении масштаба по оси ординат в 10 раз), во всем исследованном интервале концентраций монотонно возрастает.

Из этих результатов следует, что по мере повышения содержания фтористого водорода в ДЖС  $HF-(C_2H_5)_2CO$  наблюдается монотонное смещение полосы валентных колебаний CO-групп в сторону низких частот. В спектре первого из образующихся молекулярных комплексов сдвиг  $\nu_{CO}$  относительно частоты  $1716\text{ см}^{-1}$  составляет  $18\text{ см}^{-1}$ , а в спектрах второго и третьего ГА он достигает примерно  $63$  и  $166\text{ см}^{-1}$  соответственно.

На рис. 2 приведены данные об оптической плотности чистого ацетонитрила и шести растворов  $HF-CH_3CN$ , мольное соотношение компонентов которых варьирует от 1:12 до 10:1. Анализ концентрационного изменения поглощения этих растворов в области колебаний CN-групп осложняется присутствием в спектре ацетонитрила наряду с полосой основного колебания  $\nu_{CN}$  ( $2255\text{ см}^{-1}$ ) полосы составного колебания ( $2296\text{ см}^{-1}$ )<sup>1</sup>. Полуширины этих полос близки по величине (соответственно  $14$  и  $22\text{ см}^{-1}$ ), а пиковые интенсивности отличаются в 3,25 раза. При вхождении молекул  $CH_3CN$  в состав ГА полоса колебания CN-связи уширяется до  $20\text{ см}^{-1}$ . Максимумы данных полос в спектре чистого раство-

<sup>1</sup> Квантово-химический расчет (B3LYP-6-31++G(d, p)) молекулы  $CH_3CN$  и гетероассоциатов  $(HF)_m \cdot (CH_3CN)_n$  ( $m = 1-6$ ,  $n = 1-2$ ), выполненный в работе [16], показал, что данная полоса обусловлена деформационными колебаниями углов  $CCN$  и  $HCH$ .

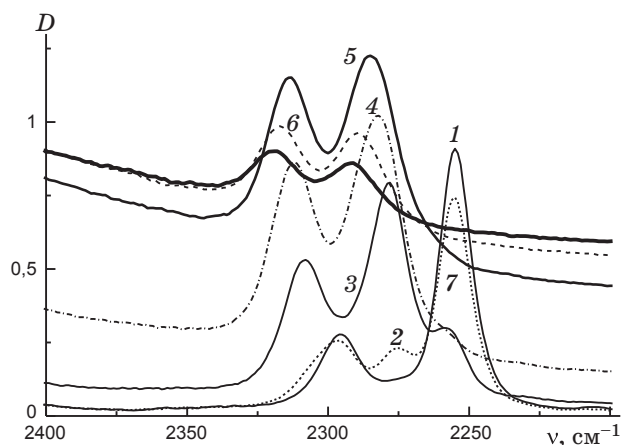


Рис. 2. Спектры оптической плотности ацетонитрила (1) и растворов  $HF-CH_3CN$  с мольным соотношением компонентов 1:12 (2), 1:1 (3), 2:1 (4), 4:1 (5), 7:1 (6) и 10:1 (7).

рителя расположены несколько дальше друг от друга (примерно на  $40\text{ см}^{-1}$ ), чем в спектрах растворов (на  $30 \pm 3\text{ см}^{-1}$ ), а их интенсивности с возрастанием мольной доли  $HF$  постепенно выравниваются<sup>2</sup> (см. рис. 2). Учет правила Френкеля и аппаратной функции спектрометра показывает, что в рассматриваемой серии спектров могут быть обнаружены только узкие полосы поглощения, отстоящие от ближайших к ним полос более чем на  $20\text{ см}^{-1}$ .

Отмеченная особенность спектра поглощения молекулы ацетонитрила не мешает нахождению частоты колебания  $\nu_{CN}$  ( $2279 \pm 5\text{ см}^{-1}$ ) первого из образующихся в ДЖС  $HF-CH_3CN$  ассоциатов (стехиометрическое соотношение молекул в котором, по данным работы [16], составляет 1:1). Появившись уже при низком содержании  $HF$  (1:12), полоса этого колебания явно доминирует в спектре эквимольной бинарной смеси. Монотонное уширение данной полосы и смещение в область высоких частот, происходящие с ростом концентрации раствора, являются следствием образования в нем более крупных молекулярных комплексов.

Однозначно установить число таких комплексов нельзя из-за сильного перекрывания (обусловленного отмеченными выше особенностями данной серии спектров) соответствующих им полос  $\nu_{CN}$  с полосой первого ГА, а также, воз-

<sup>2</sup> Монотонное сближение этих двух полос, сопровождающееся “перекачкой” интенсивности от основного колебания к составному, является следствием резонанса. В настоящей работе он не рассматривается, поскольку никак не влияет на выводы, полученные в ходе анализа спектров ДЖС  $HF-CH_3CN$ .

можно, с интенсивной комбинационной полосой. При этом интересно отметить, что зарегистрированное в опыте повышение частоты колебаний CN-связи при вхождении молекулы  $\text{CH}_3\text{CN}$  в состав ГА 1:1 ( $\Delta\nu_{\text{CN}}^{\text{exp}} = -24 \text{ см}^{-1}$ ) практически совпадает с данными квантово-химических расчетов [16]:  $\Delta\nu_{\text{CN}}^{\text{calc}} = -23 \text{ см}^{-1}$ . Из них также следует, что дальнейший переход молекулы ацетонитрила в ГА 4:1 сопровождается несколько меньшим высокочастотным сдвигом полосы  $\nu_{\text{CN}}$  – на  $18 \text{ см}^{-1}$ . (Здесь и далее вместо “ГА со стехиометрическим соотношением молекул 4:1” для краткости будем писать “ГА 4:1”.) Такой результат, который явно не может претендовать на большую точность, качественно полностью согласуется с экспериментом, в котором при увеличении мольного соотношения компонентов раствора от 1:1 до 10:1 частота рассматриваемой полосы возрастает примерно на  $13\text{--}15 \text{ см}^{-1}$ .

Таким образом, изучение концентрационного хода оптической плотности ДЖС  $\text{HF}-\text{CH}_3\text{CN}$  в области CN-колебаний молекулы ацетонитрила позволяет заключить, что в этой системе образуется не менее двух разных типов ГА.

На рис. 3 представлены спектры оптической плотности N,N-диметилформамида (ДМФА) и семи его растворов во фтористом водороде, состав которых изменялся от 1:12 до 7:1. Максимум полосы CO-колебаний чистого ДМФА, полуширина которой составляет примерно  $45 \text{ см}^{-1}$ , находится на частоте  $1677 \text{ см}^{-1}$ . Как и в рассмотренных выше случаях, наряду с полосой поглощения чистого растворителя уже при малых концентрациях HF (не менее 1:12) в спектре четко видна полоса  $\nu_{\text{CO}}$  первого из образующихся в растворе ГА –  $1637 \pm 5 \text{ см}^{-1}$ . Тот факт, что она смещена примерно на  $40 \text{ см}^{-1}$  в сторону низких частот, находится в согласии с данными расчета [19] молекулы ДМФА и различных гетерокомплексов  $(\text{HF})_m \cdot (\text{ДМФА})_n$  ( $m = 1\text{--}8$ ,  $n = 1\text{--}2$ ), выполненного методом функционала плотности ( $\Delta\nu_{\text{CO}}^{\text{calc}} = 55 \text{ см}^{-1}$ ).

Однако в отличие от предыдущих двух систем  $\text{HF}-\text{Solv}$  образование следующего по размеру ассоциата (судя по данным [19], характеризующегося стехиометрическим соотношением молекул 4:1) приводит к сдвигу отвечающей ему полосы  $\nu_{\text{CO}}$  в противоположную по сравнению с первым ассоциатом сторону. Положение данной полосы, находящейся между  $\nu_{\text{CO}}$  чистого растворителя и  $\nu_{\text{CO}}$  ГА 1:1, может быть оценено лишь весьма приблизительно, но сдвиг ее в область высоких частот не вызывает сомнений –  $\Delta\nu_{\text{CO}}^{\text{exp}} = -15 \pm 7 \text{ см}^{-1}$ . Еще более ощутимый “синий”

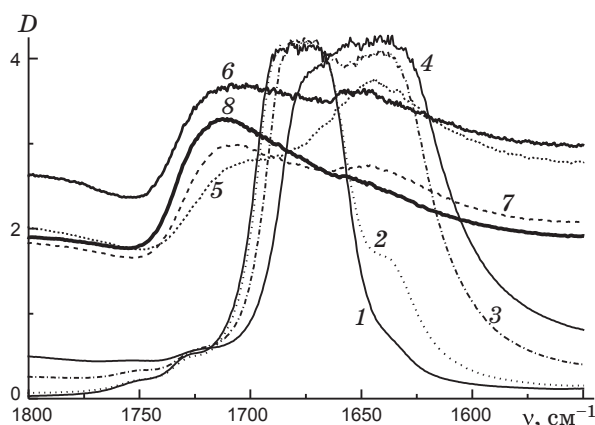


Рис. 3. Спектры оптической плотности N,N-диметилформамида (1) и растворов  $\text{HF}-\text{HCON}(\text{CH}_3)_2$  с мольным соотношением компонентов 1:12 (2), 1:2 (3), 1:1 (4), 3:1 (5), 4:1 (6), 5:1 (7) и 7:1 (8).

сдвиг наблюдается в спектрах растворов высоких концентраций, частота максимума исследуемой полосы в которых составляет  $1713 \pm 5 \text{ см}^{-1}$ .

Объяснить зафиксированное в эксперименте изменение направления смещения полосы  $\nu_{\text{CO}}$  можно, опираясь на результаты расчета [19]. Из них следует, что при включении молекулы ДМФА в состав ассоциата  $(\text{HF})_2 \cdot (\text{ДМФА})_2$  рассматриваемое колебание перестает быть характерным по форме<sup>3</sup>, а при вхождении ее в молекулярный комплекс  $(\text{HF})_8 \cdot (\text{ДМФА})_2$  основной вклад в это колебание начинает вносить изменение естественной координаты CN. Величина и направление вычисленного частотного сдвига ( $-22 \text{ см}^{-1}$ ), происходящего при переходе от ГА 1:1 к ГА 4:1, находятся в согласии с данными измерений.

Расчетов более крупного молекулярного гетерокомплекса не проводилось, но, по-видимому, у образующих его молекул ДМФА форма рассматриваемого колебания остается примерно такой же, как в ГА 4:1. Это может быть причиной дальнейшего повышения частоты данного колебания с увеличением числа входящих в ассоциат молекул фтористого водорода.

## Выводы

В итоге проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

– предложен и опробован на примере трех ДЖС  $\text{HF}-\text{Solv}$  простой способ обнаружения в раст-

<sup>3</sup> Одновременно с изменением естественной координаты длины связи CO происходят изменения координат CN, HCO и HCN.

воре прочных гетероассоциатов и определения числа различных их типов;

– лежащий в его основе анализ изменения с концентрацией раствора положений интенсивных полос колебаний кратных связей молекул растворителя показал, что спектральным проявлением образования ГА разного состава являются заметные частотные сдвиги (примерно на  $15\text{--}170\text{ см}^{-1}$ ) этих полос;

– если форма рассматриваемого колебания молекулы Solv при ее переходе из чистого растворителя в состав ассоциатов всех типов остается практически постоянной, то отвечающие им частотные сдвиги имеют один и тот же знак. Изменение формы анализируемого колебания при вхождении молекулы Solv в какой-либо из ассоциатов может привести к инверсии этого знака.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-03-00329).

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Shenderovich I.G., Limbach H.-H., Smirnov S.N., Tolstoy P.M., Denisov G.S., Golubev N.S.* H/D Isotope Effects on the Low-Temperature NMR Parameters and Hydrogen Bond Geometries of  $(\text{FH})_2\text{F}^-$  and  $(\text{FH})_3\text{F}^-$  Dissolved in  $\text{CDF}_3/\text{CDF}_2\text{Cl}$  // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2002. V. 4. P. 5488–5497.
2. *Юхневич Г.В., Тараканова Е.Г.* Определение состава прочных молекулярных ассоциатов, образующихся в двойных жидких системах // *Докл. АН.* 2005. Т. 402. № 6. С. 639–642.
3. *Кириленко И.А., Суховерхов В.Ф., Иванов А.А.* Стеклообразование в системе  $\text{HF}\text{--}\text{H}_2\text{O}$  // *Докл. АН.* 1992. Т. 325. № 5. С. 987–990.
4. *Boenigh D., Mootz D.* The System Pyridine – Hydrogen Fluoride at Low Temperatures: Formation and Crystal Structures of Solid Complexes with Very Strong NHF and FHF Hydrogen Bonding // *J. Am. Chem. Soc.* 1988. V. 110. № 7. P. 2135–2139.
5. *Adams R.M., Katz J.J.* Infrared Spectral Studies of Hydrogen Bonding Phenomena in Solutions Containing Hydrogen Fluoride // *J. Mol. Spectrosc.* 1957. V. 1. № 2. P. 306–332.
6. *Couzi M., Le Calve J., Huong P.V., Lascombe J.* Étude spectroscopique des complexes moléculaires entre les fluorures d'hydrogène et de deutérium et divers accepteurs de proton en phase gazeuse // *J. Mol. Struct.* 1970. V. 5. P. 363–373.
7. *Andrews L., Johnson G.L.* FTIR Spectra of Water-Hydrogen Fluoride Complexes in Solid Argon. Evidence for Inversion doubling in the HF librational Modes of  $\text{H}_2\text{O}\cdots\text{HF}$  // *J. Chem. Phys.* 1983. V. 79. № 8. P. 3670–3677.
8. *Fraser G.T., Pine A.S.* Van der Waals Potentials from the Infrared Spectra of Rare Gas-HF Complexes // *J. Chem. Phys.* 1986. V. 85. № 5. P. 2502–2515.
9. *Bulanin M.O., Bulychev V.P., Tokhadze K.G.* The Lengthening of the H–X Bond in  $\text{B}\cdots\text{H}\text{--}\text{X}$  Van der Waals Complexes // *J. Mol. Struct.* 1989. V. 200. P. 33–40.
10. *Huisken F., Kaloudis M., Kulcke A., Laush C., Lisy J.M.* Vibrational Spectroscopy of Small  $(\text{HF})_n$  Clusters ( $n = 4\text{--}8$ ) in Size-Selected Molecular Beams // *J. Chem. Phys.* 1995. V. 103. № 12. P. 5366–5377.
11. *Asselin P., Soulard P., Alikhani M.E., Perchard J.P.* Investigation of the Gase Phase Infrared Spectrum of HF Complexed with Dimethyl Ether from Both Cell- and Supersonic Jet-FTIR Experiments // *Chem. Phys.* 2000. V. 256. № 2. P. 195–205.
12. *Bulychev V.P., Grigoriev I.M., Gromova E.I., Tokhadze K.G.* Study of the Band Shape of the  $\text{H}_2\text{O}\cdots\text{HF}$ ,  $\text{H}_2\text{O}\cdots\text{DF}$ , and  $\text{H}_2\text{O}\cdots\text{HCl}$  Complexes in the Gas Phase // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2005. V. 7. P. 2266–2278.
13. *Юхневич Г.В., Тараканова Е.Г.* Определение методом ИК спектроскопии состава гетерокомплексов, образующихся в бинарной системе // *Опт. и спектр.* 2006. Т. 101. № 5. С. 755–762.
14. *Юхневич Г.В., Тараканова Е.Г., Суховерхов В.Ф., Быков И.В.* Состав гетероассоциатов, образующихся в двойных жидких системах  $\text{HF}$ –пиридин и  $\text{HF}$ –формамид // *Изв. АН. Сер. хим.* 2007. № 7. С. 1281–1287.
15. *Юхневич Г.В., Тараканова Е.Г., Кепман А.В., Быков И.В.* Состав гетероассоциатов, образующихся в двойной жидкой системе  $\text{HF}\text{--}\text{Et}_2\text{O}$  // *Изв. АН. Сер. хим.* 2008. № 9. С. 1833–1839.
16. *Тараканова Е.Г., Юхневич Г.В.* Состав и строение гетероассоциатов, образующихся в двойной жидкой системе  $\text{HF}\text{--}\text{CH}_3\text{CN}$  // *Журн. структ. химии.* 2008. Т. 49. № 4. С. 707–716.
17. *Тараканова Е.Г., Юхневич Г.В.* Строение гетероассоциатов, образующихся в двойной жидкой системе  $\text{HF}\text{--}(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$  // *Журн. структ. химии.* 2010. Т. 51. № 1. С. 83–89.
18. *Юхневич Г.В., Тараканова Е.Г., Быков И.В.* Состав гетероассоциатов, образующихся в двойной жидкой системе  $\text{HF}$ –диэтилкетон // *Журн. неорганич. химии.* 2010. Т. 55. № 4. С. 621–629.
19. *Тараканова Е.Г., Юхневич Г.В.* Структура молекулярных комплексов, присутствующих в растворах  $\text{HF}\text{--}\text{DMFA}$  // *Тез. докл. VI Всероссийск. конф. “Молекулярное моделирование”.* М., 2009. С. 116.
20. *Химическая энциклопедия.* М.: Сов. энциклопедия. 1990. Т. 2. С. 22.