

**В.В. Гончарук, В.Б. Лапшин, Т.Н. Бурдейная, Т.В. Плетенева,
А.С. Чернопятко, И.Д. Атаманенко, А.С. Ульяновцев,
Е.В. Успенская, А.О. Самсоны-Тодоров, В.В. Таранов,
Г.М. Николаев, А.А. Кавицкая, И.Ю. Романюкина,
Р.В. Приходько, Е.А. Орехова, В.А. Яременко,
А.С. Котельчук, А.В. Сыроешкин**

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ВОДЫ, ОБЕДНЕННОЙ ПО ТЯЖЕЛЫМ ИЗОТОПАМ

Получены данные по физико-химическим свойствам легкой воды (концентрация дейтерия снижена до соотношения D/H = 4 ppt, а изотопа кислорода 18 – до соотношения $^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 750$ ppt): температуре плавления и кипения, кинематической вязкости, плотности, времени спин-спиновой релаксации протонов, коэффициентам самодиффузии, малоугловому рассеянию лазерного света. Определено, что биологическая активность легкой воды обусловлена механизмами, отличными от лигандоиндуцированных токсических эффектов. Предложено объяснение обнаруженных значительных изменений свойств легкой воды по сравнению с высокоомной водой геохимически обычного изотопного состава, основанное на механизме формирования супрамолекулярных плотностных неоднородностей в воде – дейтеростабилизированных гетерофазных кластеров.

Ключевые слова: физико-химические свойства воды, протиевая вода, легкая вода, тяжелая вода, токсичность воды.

Введение. Природная вода представляет собой многокомпонентную смесь молекул различного изотопного состава – изотопологов. В природных водах в 1000000 молекул в среднем содержится 997284 молекул $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$, 311 молекул $^1\text{HD}^{16}\text{O}$, 390 молекул $^1\text{H}_2^{17}\text{O}$ и около 2005 молекул $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ [1]. Концентрация молекул воды, содержащих тяжелые изотопы D, ^{17}O , ^{18}O , в природной воде колеблется в пределах, зафиксированных в основных международных стандартах изотопного состава гидросферы VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) и SLAP (Standard Light Antarctic Precipitation), введенных Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) [1,2]. Стандарт VSMOW определяет изотопный состав глубинной воды Мирового океана, стандарт SLAP – изотопный состав природной воды из Антарктики (концентрация дейтерия варьи-

рует в зависимости от глубины льда и расположения на материке в пределах ~ 10 ppm при современном уровне на поверхности ~ 90 ppm (станция EDC [3]). По стандарту VSMOW, абсолютное содержание дейтерия D/H и кислорода-18 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ в океанической воде составляет соответственно $155,76 \pm 0,05$ и $2005,20 \pm 0,45$ ppm. [4]. Содержание самого легкого изотополога $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ в воде, соответствующей по изотопному составу VSMOW, составляет 99,73 мол. %, а соответствующей по изотопному составу SLAP – 99,76 мол. %. Стандарт SLAP характеризует самую легкую природную воду на Земле. Так, концентрации в этой воде дейтерия D/H составляют 89, кислорода-18 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ – 1894 ppm [5]. Легкая вода определяется следующим образом: в ней в результате специальной очистки увеличена доля самого легкого изотополога $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ по сравнению со стандартом SLAP.

Основанием для наименования легкой воды как обедненной по дейтерию, по-видимому, явилось то, что в процессе удаления тяжелых изотопологов путем ректификации достигалось наиболее существенное снижение содержания дейтерия, а также технологические трудности определения содержания изотопов кислорода. В [6 – 8] показано, что "deuterium-depleted water" как частный случай легкой воды обладает выраженными противоопухолевыми свойствами. Лёгкая вода ускоряет обменные процессы – как физико-химические, так и биологические, что приводит к различным физиологическим эффектам: иммуностимулирующим, репродуктивным, а также к изменениям чувствительности рецепторов к катехоламинам и ангиотензину [9].

Можно предположить, что в основе столь значимых биологических ответов, зафиксированных по результатам экспериментальных исследований, лежат общие причины, к которым, в первую очередь, следует отнести изменение физико-химических свойств воды. Поэтому определению классических "табличных" физико-химических параметров легкой воды и сравнительному описанию результатов (для препаратов легкой, природной и тяжелой воды) новых методов изучения ассоциированных жидкостей и посвящена настоящая статья.

Методика эксперимента. Деионизированную (высокоомную) воду (18 МОм·см при 25°C) готовили путем очистки пирогенной дистиллированной воды на системе Milli-Q (фирма "Millipore", Великобритания). Легкая вода была получена на предприятии ОАО "Алмаз" методом вакуумной ректификации. Концентрация дейтерия D/H в легкой воде составляла 4, кислорода-18 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ – 750 ppm по сравнению с D/H = 140 и $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ = 1966 ppm для деионизированной воды. Тяжелая вода (99,9%) соответствовала ТУ 95-1893-89. В результате проведенного исследования с использованием атомно-абсорбционной спектрометрии с электротермической атомизацией и зеемановской коррекцией фона [10] во всех препаратах воды не обна-

ружены такие элементы, как Al, V, Cr, Mn, Ni, Fe, Cu, Zn, As, Cd, Pb (концентрация – $< 0,1$ нМ; предел обнаружения – $0,1 - 10$ нМ)

Кроме того, в указанных препаратах воды с использованием методов, описанных в [11], не зафиксировано присутствие примесных частиц дисперсной фазы.

Определение изотопного состава. Для измерения концентрации дейтерия использовали методы масс-спектрометрии [12] и многопроходной лазерной абсорбционной спектроскопии на приборе LWIA-24d фирмы "Los Gatos Research, Inc." [13]. Содержание кислорода-18 контролировали также при помощи многопроходной лазерной абсорбционной спектроскопии.

Плотность воды измеряли на цифровом плотномере LiquiPhysics Excellence DM45DR фирмы "Mettler Toledo", а также на пикнометре ПЖ-2 согласно ГОСТу 18995.1-73. Относительная ошибка метода – $0,016\%$; $R = 0,95$.

Вязкость воды определяли при помощи капиллярного стеклянного вискозиметра типа ВПЖ-2 (внутренний диаметр капилляра – $0,56$ мм) с дополнительным устройством термостатирования [14]. Относительная ошибка метода – $0,89\%$.

Температуру кипения воды измеряли на приборе Свентаславского [14].

Температуру плавления воды определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Скорость сканирования – 4 град/мин. Исследуемый раствор, масса которого составляла $0,0050 - 0,0002$ г, запрессовывали в контейнер и подвергали охлаждению жидким азотом в течение одной – двух минут до температуры 223 К. Предполагалось, что при столь высоких скоростях охлаждения изменения его фазового состояния будут минимальными. Затем систему выдерживали в течение нескольких минут при температуре 223 К для установления равновесия. Термограммы снимали в интервале $223 - 293$ К. Для определения величины воспроизводимости результатов ДСК и их дисперсий было проведено по 10 измерений для каждого образца воды. Рассчитанная выборочная дисперсия составляла $0,012$.

Время спин-спиновой релаксации протонов воды определяли методом ЯМР-спинового эха [15].

Молекулярно-динамические характеристики воды определяли методом рассеяния моноэнергетических нейтронов ($13,289$ мэВ) [16]. Для расчета коэффициентов самодиффузии результаты обрабатывали по модели Оскотского-Иванова.

Дисперсионный анализ образцов воды и наночастиц проводили при помощи методов малоуглового рассеяния лазерного излучения (LALLS) и динамического рассеяния света (DLS) (фотонная корреляционная спектроскопия) на приборах MasterSizer 2000 и ZetaSizer Nano ZS ("MALVERN Instruments") [10,11].

Значения pH измеряли на pH -метре PP-20 ("Sartorius"), снабжённом термодатчиком, и при помощи спектрофотометрии с применением кислотно-основного индикатора фенолового красного ($pK_a=7,4$) при концентрации 30 мкМ [17].

Биологическую активность образцов воды изучали на клеточном биосенсоре *Spirostomum ambigua*. Установка для исследования поведения инфузории *S. ambigua*, инкубированной в водные образцы, состояла из водного термостата, 5-луночного планшета и бинокля МБС-10 [18]. Для освещения использовали маломощные лампы (~10 Вт) дневного света.

Результаты и их обсуждение. Биологическая активность легкой воды. Сведения о биологических и терапевтических эффектах легкой воды требуют ответа о механизме этого действия. При обеднении высокоомной воды по тяжелым изотопам ректификацией наибольшее снижение (более чем на порядок) претерпевает концентрация дейтерия. Известно, что и кинетический изотопный эффект наиболее выражен для пары протий – дейтерий. Биологические эффекты при переходе от деионизированной природной воды к легкой могут быть обусловлены изменением кинетики скоростьлимитирующих стадий метаболических цепочек за счет снижения концентрации $^1HD^{16}O$ с 15,57 до 0,44 мМ (легкая вода с соотношением D/H = 4 ppm).

В табл. 1 показано, что время жизни клеточного биосенсора снижается более чем в 10 раз в воде как обедненной по тяжелым изотопам, так и обогащенной по содержанию дейтерия. Клеточный биосенсор применен нами как одна из разновидностей физико-химических датчиков.

Таблица 1. Биологическое действие легкой воды, обычной по изотопному составу высокоомной воды и разбавленной тяжелой воды на клеточный биосенсор ($n = 9$)

Показатель	D/H, ppm		
	4	140	265
Время жизни клеточного биосенсора (при $28 \pm 0,1^\circ C$), мин	$5,6 \pm 0,4$	64 ± 10	$4,3 \pm 0,3$
Энергия активации процесса перехода из активного состояния в неподвижное без рефлекса на раздражители ($26^\circ C - 36^\circ C$), кДж/моль	139 ± 11	138 ± 15	104 ± 17

Клеточный биосенсор реагирует на любые химические вещества, оказавшиеся в водном растворе, по показателю изменения энергии активации процесса клеточного перехода, например на D-моно- и дисахариды [18].

При изучении действия препаратов воды с измененным изотопным составом энергия активации процесса клеточного перехода остается практически неизменной. Адаптационный эффект при попадании организма в новую среду обычно связан с ускорением обменных процессов, что может результативаться в виде разнообразных физиологических проявлений [19]. По-видимому, свободноживущая олиготрофная инфузория *S. ambigua* оказывается адаптированной именно к природному (для пресных вод восточно-европейской равнины) соотношению изотопов водорода и кислорода воды. Это явление указывает на то, что биологический эффект изменения изотопного состава воды связан не с токсическим действием тяжелых изотопов, а со свойствами воды как растворителя.

Физико-химические свойства легкой воды. Оказалось, что "классические" физико-химические свойства легкой воды отличаются от деионизированной воды природного изотопного состава (табл. 2). Различия в поверхностном натяжении (на границе "вода – воздух") для пары легкая вода – деионизированная вода сравнимы с таковыми для пары деионизированная вода – тяжелая вода. По параметру кинематической вязкости легкая вода более близка к деионизированной воде природного изотопного состава, чем деионизированная вода к тяжелой. Следует подчеркнуть, что плотность легкой и деионизированной воды в значительной степени определяется концентрацией тяжелых изотопов кислорода (см. табл. 2, строка 3).

Температуры фазовых переходов у легкой воды значительно снижены. Уменьшение температуры замерзания легкой воды $< -1^{\circ}\text{C}$ превышает таковое для 100 мМ раствора хлорида натрия или сахарозы. Это кажущееся нарушение второго закона Рауля, как, по-видимому, и изменение эбулиоскопической постоянной легкой воды (температура кипения снижена на 7°C), позволяют предположить, что легкая вода представляет собою ассоциированную жидкость, ранее недостаточно изученную. Необходимо отметить, что современные квантово-механические модели работают, усваивая при моделировании другие физико-химические константы, полученные для реальной гетерогенной по изотопному составу жидкости [20, 21].

Изменение свойств жидкости при снижении концентрации тяжелых изотопов свидетельствует об "управляющей" функции молекул воды, содержащих тяжелые изотопы: на $\sim 3\ 000$ молекул $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ приходится одна молекула $^1\text{H}^{16}\text{O}$, одна молекула $^1\text{H}_2^{17}\text{O}$ и 5 – 7 молекул $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ [1]. Такая реализация изотопного эффекта возможна через кластерную организацию ассоциированной жидкости. Увеличение числа связанных молекул в легкой воде и ее большая "гомогенность" по структуре подтверждается

изменением ее молекулярно-динамических свойств (см. табл. 2, строки 6 – 8). В легкой воде увеличивается коэффициент диффузии, отражающий $D_l = 0,63 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ по сравнению с деионизированной водой ($D_l = 0,46 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$). Ту же тенденцию демонстрирует и замена протия на дейтерий в препарате тяжелой воды.

Таблица 2. Физические свойства препаратов различного изотопного состава ($T = 20 \pm 0,04^\circ\text{C}$)

№	Параметр	Легкая вода D/H = 4	Деионизированная вода природного изотопного состава D/H = 140	Тяжелая вода 99%D ₂ O
1	Кинематическая вязкость, мм ² /с	0,987	1,012	1,274
2	Поверхностное натяжение, мН/м	75,172	72,860	67,800
3	Плотность, г/см ³	0,99692*	0,99820** 0,99691*	1,1042
4	Температура кипения, °C	93,7****	99,9	101,4
5	Температура плавления, °C	от – 4 до –1****	0	3,8
6	Время спин-спиновой релаксации протонов (T ₂), с	0,347 ± 0,024	2,000 ± 0,140	–
7	Вклад в общий коэффициент самодиффузии от коллективных движений ($D_l \cdot 10^9$), м ² с ⁻¹	0,63	0,46	0,52
8	Вклад в общий коэффициент самодиффузии от одночастичных движений ($D_f \cdot 10^9$) м ² с ⁻¹ ($D_l + D_f = D$ – общий коэффициент самодиффузии)	1,60	1,77	1,50
9	Время жизни молекул в колебательном состоянии вокруг центра равновесия ($\tau_0 \cdot 10^{12}$), с	2,08	2,80	2,79

*¹⁸O/¹⁶O = 757; **¹⁸O/¹⁶O = 1966 ppm (при T = ± 25°C); ***масса образца – 400÷500 г; **** в зависимости от массы образца.

Значительное уменьшение времени спин-спиновой релаксации ($0,35 \pm 0,02$ с против $2,00 \pm 0,10$ с соответственно для легкой и деионизированной воды (см. табл. 2, строка 6)) означает резкое снижение степеней свободы в легкой воде. Вероятно, удаление дейтерия приводит к устранению геометрических эффектов в сетке водородных связей. Полученные результаты хорошо согласуются с понижением температуры замерзания легкой воды.

Возможный механизм реализации изотопного эффекта при формировании воды природного изотопного состава. Причины различия свойств легкой и деионизированной воды имеют, с нашей точки зрения, следующее объяснение. Ранее в [22 – 27] была выдвинута гипотеза о формировании в воде природного изотопного состава плотностных неоднородностей субмиллиметрового диапазона – дейтеростабилизированных гигантских гетерофазных кластеров (ГГК) с временами релаксации более одной секунды. Следует подчеркнуть, что долгоживущие супрамолекулярные плотностные неоднородности (гигантские по сравнению с хорошо известными нанокластерами) экспериментально наблюдали и другие исследователи [28, 29]. Эти плотностные неоднородности воды стабилизированы тяжелыми изотопологами при их вероятном расположении на поверхности плотностных неоднородностей, что и позволяет им реализовать "управляющую" функцию.

Как отмечалось в [22, 24], увеличение гомогенности воды по изотопному составу ведет к разрушению ГГК. Верно и обратное утверждение – в легкой воде затруднено образование последних. Это демонстрирует проведенный эксперимент по индукции формирования ГГК латексными наночастицами. Как и для любого дисперсного образования в коллоидном растворе, для формирования ГГК необходима "затравка". При измерении размерных спектров плотностных неоднородностей с помощью метода LALLS [11] возможна регистрация ГГК субмиллиметрового диапазона, индуцированных наночастицами (в качестве фона используют тот же препарат воды, в который вносят раствор наночастиц). В табл. 3 показано, что такая индукция формирования ГГК возможна только в воде природного изотопного состава.

При анализе взвесей стандартных латексных микросфер нанометрового диапазона методом малоуглового рассеяния лазерного света обнаружены значительные расхождения в размерных спектрах от нормативных значений. Так, для гидрофобных наносфер диаметром < 100 нм их изучаемый диаметр оказывается превышенным на порядки, что объясняется инициацией наночастицами образования ГГК воды. При исследовании более крупных микрочастиц не происходит изменение размерных спектров: диаметр совпадает с заявленным значением.

Таблица 3. Инициализация латексными наночастицами формирования плотностных неоднородностей – гигантских гетерофазных кластеров в препаратах воды различного изотопного состава

Истинный (паспортный) размер наночастиц, нм	Измеренный размер плотностных неоднородностей в различных растворителях, нм	
	Легкая вода	Обычная вода
20	25 ± 5	10000 ± 500
40	50 ± 7	10100 ± 200 26100 ± 1000
80	85 ± 7	30100 ± 900
305	315 ± 5	315 ± 5
1200	1300 ± 50	1400 ± 100

Примечание. Концентрация сульфатированных наночастиц (фирма "Invitrogen") – 0,00005 объем.%. Все измерения проведены в режиме циркуляционного перемешивания.

В легкой воде новые ГГК не инициализируются наночастицами. Сульфатированные латексные частицы с размерами > 100 нм не приводят к формированию ГГК. В отдельных экспериментах было выявлено, что гидрофобные наночастицы более эффективны в отношении индукции ГГК, т.е. вызывают образование последних при более низких концентрациях, чем сульфатированные наночастицы. Совокупность указанных данных позволяет предположить, что, помимо ранее описанных нами колмогоровских механизмов белого каскада диссипации кинетической энергии в тепловую [24], значительный вклад в формирование ГГК могут вносить дисперсионные (дерягинские) взаимодействия.

Снижение концентрации ГГК в легкой воде [24, 25] приводит к образованию жидкости, которая более близка к модели "континуальной" воды с пониженными значениями температуры фазовых переходов, вязкости и повышенным поверхностным натяжением. Не исключено, что при изучении свойств образцов легкой воды с более высокой концентрацией изотопа $^1\text{H}_2\ ^{16}\text{O}$ обнаружится дальнейшее снижение температуры плавления и кипения в сторону, "указанную" периодическим законом Менделеева для гидридов элементов II периода и VI группы основной подгруппы.

Выводы. На основании полученных данных можно заключить:

– по ряду физико-химических свойств легкая вода является новой, ранее малоизученной ассоциированной жидкостью;

– возможным механизмом реализации "управляющей" функции тяжелых изотопологов молекул воды является формирование плотностных неоднородностей – дейтеростабилизированных гигантских гетерофазных кластеров;

– биологические эффекты легкой воды не связаны с лигандозависимым токсическим действием, а обусловлены адаптационными причинами.

Резюме. Отримано дані за фізико-хімічними властивостями протиевой (так званої "легкої") води (вміст дейтерію знижено до співвідношенні $D/H = 4$ ppm, а відношення $^{18}O/^{16}O = 750$ ppm): температурі плавлення і кипіння, кінематична в'язкість, поверхневого натягу, щільності, часу спин-спінової релаксації протонів, коефіцієнтів самодифузії, малокутового розсіювання лазерного світла. Отримано вказівку на те, що біологічна активність протиевой води обумовлена механізмами, відмінними від лігандоіндукованих токсичних ефектів. Запропоновано механізм значних змін властивостей протиевой води (у порівнянні з високомною водою геохімічно звичайного ізотопного складу), пов'язаний з формуванням супрамолекулярних густинних неоднорідностей у воді – дейтеростабілізованих гігантських гетерофазних кластерів.

*V.V. Goncharuk, V.B. Lapshin, T.N. Burdeynaya, T.V. Pleteneva,
A.S. Chernopyatko, I.D. Atamanenko, A.S. Ulyantsev, E.V. Uspenskaya,
A.O. Samsoni-Todorov, V.V. Taranov, G.M. Nikolaev, A.A. Kavitskaya,
I.U. Romanukina, R.V. Prichodyeko, E.A. Orekhova,
V.A. Yaremenko, A.S. Kotel'chuk, A.V. Syroeshkin*

PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES AND BIOLOGICAL ACTIVITY OF THE LIGHT WATER

Summary

The data on physico-chemical properties of light water (deuterium content is reduced to the ratio $D/H = 4$ ppm, the oxygen isotope $^{18}O/^{16}O = 750$ ppm): melting and boiling points, kinematical viscosity, surface tension, density, the spin-spin proton relaxation, self-diffusion coefficients, low-angle laser light scattering, were obtained. It was indicated the biological activity of light water has the mechanisms other than ligand-induced toxic effects. A mechanism is proposed significant changes in the properties of light water (compared with

purified water with geochemically normal isotopic composition) associated with the formation of supramolecular density inhomogeneities in the water – deuterium-stabilized heterophase clusters.

1. Ферронский В. И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы. – М.: Наука, 1983. – 217с.
2. Craig, H. // Science. – 1961. – **133**. – P. 1833 – 1834.
3. Augustin L., Barbante C., Barnes P.R. F. et al. // Nature. – 2004. – **429**. – P. 623 – 628.
4. Hagemann R., Niff G., Roth E. // Tellus. – 1970. – **22**, N6. – P.712 – 715.
5. De Wit J.C., van der Straaten C.M., Mook W.G. // Geostandards Newsletter. – 1980. – **4**, N 1. – P. 33 – 36.
6. Krempels K., Somlyai I., Somlyai G. // Integr. Cancer Ther. – 2008. – **7**, N3. – P. 172 – 181.
7. Somlyai G. // Biokemia. – 2007. – **31**. – P. 28 – 32.
8. Somlyai G., Jancso G. // FEBS Lett. – 1993. – **7**, N 1. – P. 344 – 366.
9. Pricope F., Stefanescu I., Titescu G. et al. // Environ. Chem. Lett. – 2003. – **1**, N2. – P. 149 – 151.
10. Красовский П.А, Карпов О.В., Балаханов Д.М. и др. // Измерит. техника. – 2010. – **8**. – С. 16 – 20
11. Syroeshkin A.V., Popov P.I., Grebennikova T.V. et al. // J. Pharm. Biomed. Anal. – 2005. – **37**, N 5. – P. 927 – 930.
12. Коростышевский И.З., Демихов Ю.Н., Березовский Ф.И. // Isotopenpraxis. – **18**, N1. – P. 10 – 15.
13. Lis G., Wassenaar L.I., Hendry M.J. // Anal. Chem. – 2008. – **80**, N1. – P. 287 – 293.
14. Гордон А., Форд Р. Спутник химика. – М.: Мир, 1976. – 541 с.
15. Babizhayev M.A., Nikolayev G.N., Goryachev S.N. et al. // Biochim. Biophys. Acta. – 2002. – **1598**. – P. 46 – 54.
16. Кармазина Т.В., Слисенко В.И., Василькевич А.А. и др. // Химия и технология воды. – 2002. – **24**, № 2. – С. 109 – 119.
17. Галкин М.А., Сыроешкин А.В. // Биохимия. – 1999. – **64**, Вып. 10. – С. 1393 – 1403.
18. Быканова С.Н., Суздалева О.С., Серегина О.Б. и др. // Электрон. журн. "Исследовано в России". – 2003. – **98**. – С. 1114 – 1129.
19. Плетенева Т.В., Саломатин Е.М., Сыроешкин А.В. и др. Токсикологическая химия. – М.: ГЕОТАР – Медиа, 2008. – 509 с.
20. Corcelli S.A., Lawrence C.P., Skinner J.L. // J. Chem. Phys. – 2004. – **120**, N17. – P. 8107 – 8117.
21. Lappi S.E., Smith B., Franzen S. // Spectrochim. Acta, A. – 2004. – **60**. – P. 2611 – 2619.
22. Гончарук В.В., Смирнов А.Н., Лапшин В.Б. и др. // Химия и технология воды. – 2005. – **27**, №2. – С. 111 – 137.
23. Гончарук В.В., Сыроешкин А.В., Смирнов А.Н. и др. // Вест. Рос. ун-та дружбы народов, Сер. Медицина. – 2006. – **2**, №34. – С. 90 – 94.

24. Сыроешкин А.В., Смирнов А.Н., Гончарук В.В. и др. // Электрон. журн. "Исследовано в России". – 2006. – **88**. – С. 843 – 854.
25. Гончарук В.В., Успенская Е.В., Сыроешкин А.В. и др. // Фармация. – 2007. – № 5. – С. 21 – 23.
26. Кузнецов Д.М., Смирнов А.Н., Сыроешкин А.В. // Рос. хим. журн. – 2008. – **52**, № 1. – С. 114 – 121.
27. Ульяновцев А.С., Успенская Е.В., Плетенева Т.В. и др. // Хим.-фарм. журн. – 2009. – **43**, № 11. – С. 47 – 51.
28. Фесенко Е.Е., Терпугов Е.Л. // Биофизика. – 1999. – **44**, Вып. 1. – С. 5 – 9.
29. Пономарев О.А., Закирьянов Ф.К., Терпугов Е.Л. и др. // Там же. – 2001. – **46**, Вып. 3. – С. 402 – 407.

Ин-т коллоид. химии и химии воды
им А.В. Думанского НАН Украины,
г. Киев;
МГУ им. М.В. Ломоносова,
Рос. ун-т дружбы народов,
ООО "НТЦ" Тонкие технологии",
г. Москва, Россия;
Timantti AB, г. Стокгольм, Швеция

Поступила 24.11.2010