

СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИРОДНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В ДНЕПРОВСКОЙ ВОДЕ

**Н.А. Клименко¹, Е.А. Самсоны-Тодорова¹, Л.А. Савчина¹,
И.Н. Лавренчук², Т.Н. Засядько¹**

¹ Институт коллоидной химии и химии воды им. А.В. Думанского
НАН Украины, г. Киев;

² ПАО АК "Киевводоканал", г. Киев, Украина

Поступила 23. 07. 2011 г.

Оценено изменение характеристик природных органических веществ р. Днепр (г. Киев) по сезонам года на основе определения таких параметров, как общий органический углерод, поглощение в ультрафиолетовой области (UV_{254}), специфическая абсорбция (SUVA) и цветность. Показано, что в различные сезоны года для воды в этом районе характерны средние значения величин SUVA и достаточно высокое содержание общего органического углерода.

Ключевые слова: общий органический углерод, природные органические соединения, эксклюзивная хроматография, UV_{254} , SUVA.

Введение. Природные органические соединения (ПОС) в воде поверхностных источников питьевого водоснабжения представляют собой сложную гетерогенную смесь органических соединений, которые являются продуктами разложения остатков животного и растительного происхождения. Они состоят из гуминовых соединений, гидрофильных кислот, протеинов, липидов, карбоксильных кислот, полисахаридов, аминокислот, углеводов [1].

Наличие ПОС в воде существенно влияет на протекание многих процессов обработки воды (окисление, коагуляция, адсорбция), обуславливает появление в воде вторичных продуктов загрязнения, определяет ее биологическую стабильность [2 – 6].

Количество, характеристики и свойства ПОС в воде поверхностных источников существенно различаются в зависимости от их происхождения и биогеохимических циклов в окружающей среде [7 – 9]. Содержание ПОС в днепровской воде в разы, а иногда и на порядок превышает величину общего органического углерода (ООУ) в рассмотренных регионах (табл. 1).

© Н.А. КЛИМЕНКО, Е.А. САМСОНЫ-ТОДОРОВА, Л.А. САВЧИНА, И.Н. ЛАВРЕНЧУК,
Т.Н. ЗАСЯДЬКО, 2012

Таблица 1. Содержание органических веществ в источниках питьевого водоснабжения в различных регионах мира

Источник водозабора		ООУ, мгС/дм ³	Лит. источник
Месторасположение	Название		
Осло (Норвегия)	Elvaga Lake	4,9	[10]
Ренн (Франция)	Le Meu River	2,3 – 3,2	[11]
Варшава (Польша)	Zegrzyńskie Lake	7,0 – 17,0	[12]
Тампере (Финляндия)	Roine Lake	5,4 – 5,6	[13]
Афины (Греция)	Mornos River	1,0 – 2,0	[14]
Барселона (Испания)	Llobregat River	4,39 – 8,98	[15]
Киев (Украина)	р. Днепр	8,6 – 18,8	Наши данные
Чернигов (Украина)	р. Десна	4,5 – 9,6	
Стамбул (Турция)	Terkos Lake	3,55 – 5,85	[16]
	Buyukcekmece Lake	3,76 – 6,25	
	Omerli Lake	3,2 – 4,8	
о. Хонсю о. Хоккайдо	Nagara River	0,7 – 1,3	[17]
	Tokoro River	1,9	
Харбин (Китай)	Songhua River	3,9	[18]
Макао (Китай)	West River	1,5 – 1,7	[19]
Тяньцзинь (Китай)	Luan River	4,25 – 4,52	[20]
Сеул (Корея)	Han River	3,11	[21]
Кванчжу (Корея)	Youngsan River	3,06	
Пусан (Корея)	Nackdong River	2,27	
Лоуренс (США)	Wakarusa River	5,4	[22]
	Clinton Lake	4,1	
Сиэтл (США)	South Fork Tolt River	3,3	[23]
Св. Луис (США)	Mississippi River	3,1	
Квебек (Канада)	St. Charles River	1,6 – 2,2	[24]
Шарлебург (Канада)	Des Erables Lake	1,5 – 1,8	
Сен-Фуа (Канада)	St. Lawrence River	2,1 – 2,6	
Аделаида (Австралия)	Myponga Reservoir	10,6 – 12,8	[25, 26]
Сидней (Австралия)	Woronora River	2,2 – 3,5	

Это обусловлено формированием качественного и количественного составов воды в бассейне Днепра в условиях болотистой местности, что существенно обогащает воду гумусовыми соединениями с различными физико-химическими свойствами [27].

На изменение состава ПОС и их характеристик в воде могут сильно влиять сезонные факторы, связанные с таянием снегов, паводками, дож-

дями и др. [5]. Выяснение роли ПОС и их характеристик в источниках питьевого водоснабжения, их реакционной способности в различных процессах подготовки воды является основой для решения проблемы получения безопасной питьевой воды. Обычно контролируемые параметры ХПК, рН, мутность, цветность не дают информации о свойствах ПОС и их роли в процессах подготовки воды.

Между тем наличие ПОС как комплексообразующего компонента для металлов и реагента для связывания гидрофобных органических соединений влияет на качество питьевой воды, внося свой вклад в цветность, привкус и запах воды. Кроме того, присутствие ПОС в воде определяет расходы коагулянта и дезинфектантов при водоподготовке, вызывает "отравление" мембран и служит субстратом для бактериального роста в распределительной системе [28, 29]. Увеличение расхода реагентов приводит к возникновению коррозионных процессов в распределительных системах, ухудшению органолептических показателей воды. Бактериальный рост в коммуникационных сетях также обусловлен наличием в питьевой воде остаточных количеств той части ПОС, которая является биодоступной для развития микрофлоры и приводит к вторичному загрязнению воды [30].

При оценке содержания ПОС в источнике водоснабжения и их роли в процессах водоподготовки необходимо также иметь сведения о распределении молекулярных масс фракций ПОС, оценить долю ароматических соединений, гидрофобность – гидрофильность соединений ПОС. Это возможно путем определения параметра SUVA (аббревиатура от specific ultraviolet absorption), представляющего собой величину абсорбции при $\lambda = 254$ нм (UV_{254}) на единицу концентрации ООУ. Параметр SUVA является показателем ароматичности органического вещества. В соответствии с подходами, развитыми в [31–33], предполагается, что при величине SUVA, равной 4 или выше, в составе ПОС доминируют гумусовые вещества. При этом, как было отмечено в [34], в воде преобладают гидрофобные ароматические соединения с высокой молекулярной массой (М.м), а при значении $SUVA < 3$ дм³/(м·мг) – гидрофильные. В воде с величиной SUVA, равной от 2 до 4, содержится смесь гумусовых и негумусовых соединений. Если величина SUVA равна 2 и меньше, то в составе ПОС преобладают вещества преимущественно негумусовой природы. Невысокие значения SUVA свидетельствуют о том, что вода содержит органические соединения в основном гидрофильного характера с низкими молекулярной массой и плотностью заряда [7, 35]. На основании этой градации при коагуляционной обработке указанных вод можно ожидать, соответственно, высокую, а также среднюю и низкую степени удаления ООУ. Считается, что гидрофобная и высокомолекулярная фрак-

ция ПОС является более существенным прекурсором образования вторичных продуктов обеззараживания (ВПО) воды, чем гидрофильная фракция с низкой молекулярной массой. Однако гидрофильные соединения (алифатические карбоксильные кислоты, амины, альдегиды, кетоны, эфиры, аминсахара, пептиды, протеины и др.) также вносят свой вклад в образование ВПО. Кроме того, в [36] отмечено, что бром и иод являются высокорекреационноспособными именно с гидрофильными ПОС.

Таким образом, на начальных стадиях очистки оптимизация процессов водоподготовки в первую очередь должна быть нацелена на удаление как гидрофобных, так и гидрофильных соединений для устранения нежелательных последствий для качества питьевой воды после ее обработки. Несмотря на существенную роль ПОС в формировании качества питьевой воды, комплексные исследования о наличии различных форм ПОС в поверхностных источниках питьевого водоснабжения, их сезонных изменений и влияния на процессы обработки воды с учетом специфических особенностей конкретного водного бассейна для водозаборов Днепровского бассейна практически отсутствуют.

Цель данной работы – охарактеризовать и оценить органическое вещество, которое содержится в воде р. Днепр, отобранной в районе водозабора Днепровской водопроводной станции (ДВС) выше г. Киева, и изменение его характеристик по сезонам года на основе определения таких параметров, как ООУ, UV_{254} , SUVA, цветность, а также спрогнозировать их поведение в процессах водоподготовки.

Методика эксперимента. В качестве объектов исследования использовали образцы воды, которые были отобраны из водозабора Днепровской водопроводной станции на первом подъеме (далее эта вода обозначена В1) и из резервуара чистой воды (после всех стадий очистки, предусмотренных на ДВС (далее – В2)), а также фульвокислоты (ФК), выделенные из днепровской воды путем ионного обмена [37].

Хроматографическая характеристика и распределение ФК по молекулярным массам были исследованы путем применения эксклюзивной хроматографии HPSEC (high performance size exclusion chromatography), используя УФ-детектор при 254 и 220 нм, на DIONEX DX-500 Chromatography System ("Tosoh Corporation", Japan). Метод детально описан в [4].

Содержание ООУ (mgC/dm^3) определяли методом каталитического сжигания при $800^{\circ}C$ на приборе Shimadzu TOC-V CSN (Япония). Определение UV_{254} проводили на дулучевом спектрофотометре Unico 4802 при длине волны $\lambda = 254$ нм, используя кварцевую кювету с $l = 1$ см. Величину SUVA ($dm^3/(m \cdot mg)$) рассчитывали по формуле [38]

$$SUVA = \frac{UV_{254}}{ООУ} \cdot 100.$$

Цветность воды определяли фотометрическим методом с использованием бихромат-кобальтовой шкалы согласно ГОСТу 3351-74 [39]. Оптическую плотность (A) измеряли на фотоэлектрическом колориметре КФК-2МП.

Результаты и их обсуждение. Известно, что преобладающим компонентом ПОС днепровской воды являются фульвокислоты. Их концентрация в воде в $\sim 30 - 40$ раз выше, чем гуминовых кислот (ГК) [27]. Исследования молекулярно-массового распределения ФК, выделенных из воды верхнего участка Каневского водохранилища в весенне-летний период 2000 г., показало, что эти соединения в основном имеют относительно невысокую молекулярную массу (< 1000 Да). ФК с М.м. > 1000 Да составляют лишь 11 % [40]. Превалирование в днепровской воде содержания ФК по сравнению с таковым ГК ухудшает условия очистки воды методами коагуляции и окисления. Как известно [41], устойчивость гумусовых веществ к действию окислителей и сорбентов возрастает в ряду: гуминовые кислоты – коллоидно-растворенные фульвокислоты – истинно растворенные фульвокислоты. Поэтому при очистке воды коагулированием, наряду с цветностью, обязательно должен учитываться фракционный состав обуславливающих ее гумусовых веществ, так как возрастание в нем истинно растворенных фульвокислот может привести к ухудшению процессов коагулирования, несмотря на меньшую цветность воды.

Определено молекулярно-массовое распределение ФК, выделенных из днепровской воды, путем применения хроматографии HPSEC, используя УФ-детектор при 254 и 220 нм. На рис. 1 приведены зависимости поглощения ФК в ультрафиолетовой области от времени их удерживания (t_R).

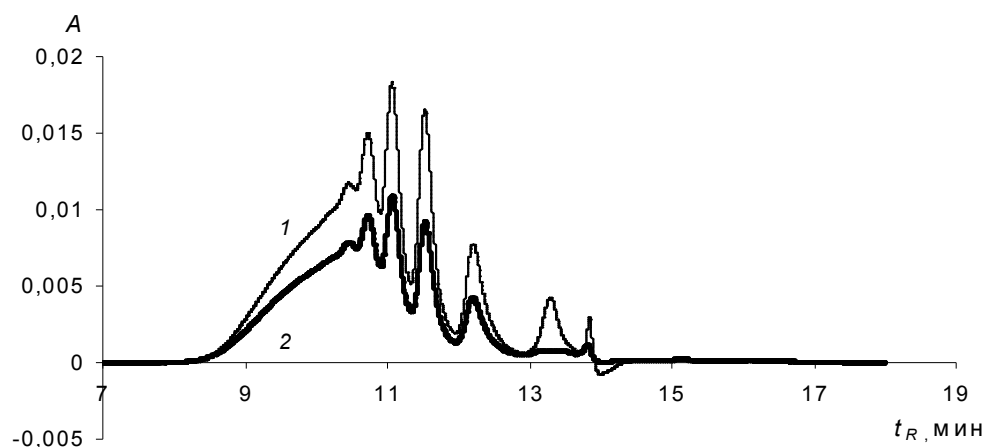


Рис. 1. Зависимость поглощения фульвокислот в ультрафиолетовой области от времени их удерживания ($\lambda = 220$ (1) и 254 нм(2)).

Из данных [4] известно, что в зависимости от величины молекулярной массы для водных фульвокислот характерны следующие величины времени их удерживания: $t_R = 8,5 - 10,8$ мин соответствует М.м. = 3500 – 1000 Да; $t_R = 10,8 - 11,3$ мин – М.м. = 1000 – 500 Да; $t_R = 11,3 - 12,3$ мин – М.м. = 500 – 300 Да; $t_R = 12,3 - 13,6$ мин – М.м. < 300 Да.

На рис. 2 показано, что для ФК из днепровской воды характерны четыре фракции с максимумами при 140; 270; 450; 640 Да. Наибольшее содержание в воде составляют фракции с М.м., которая равна 450 и 640 Да.

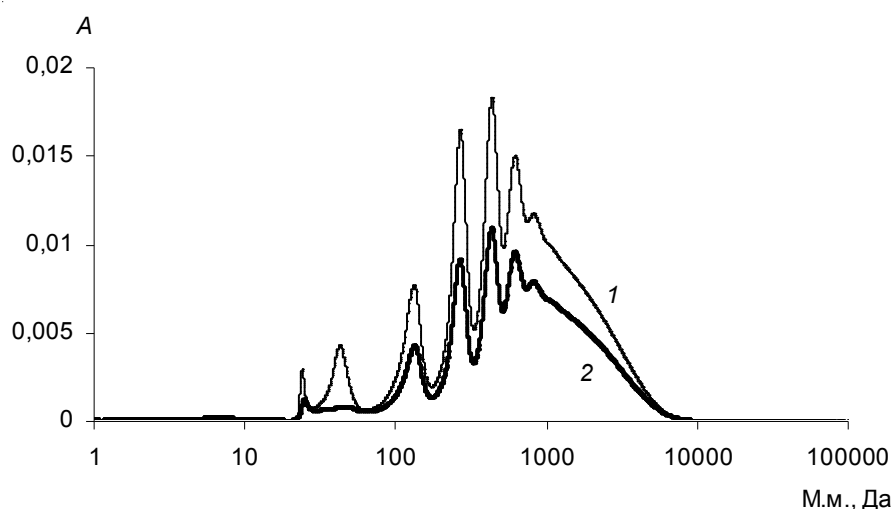
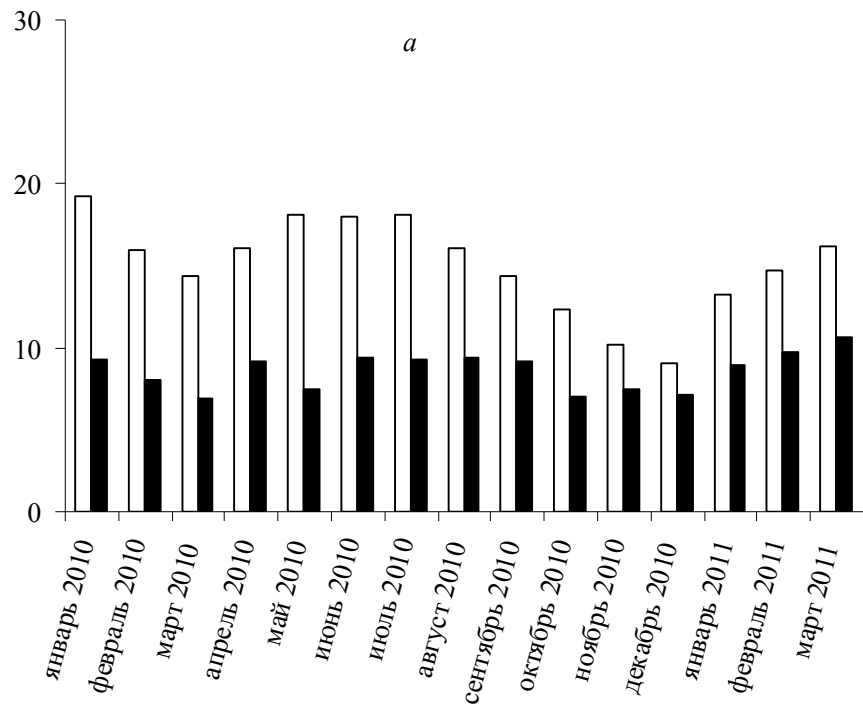


Рис. 2. Молекулярно-массовое распределение фульвокислот из воды р. Днепр ($\lambda = 220$ (1) и 254 нм (2))

Для характеристики ПОС используют разграничение их на гидрофильную и гидрофобную фракции. Можно ожидать, что преобладающее присутствие ФК в днепровской воде обуславливает превалирование гидрофильной фракции в составе ПОС вследствие того, что ФК содержат в своем составе 12 % фенольных групп, 49 % суммы алифатических и углеводородных гидроксильных групп, 15 и 24 % алифатических и ароматических карбоксильных групп [42].

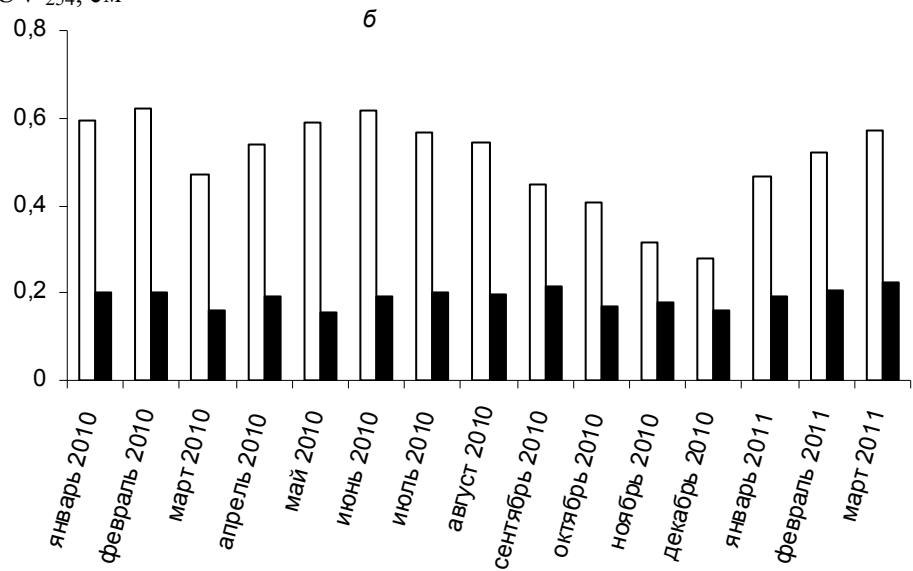
Для подтверждения этого предположения измерены величины ООУ, UV_{254} и SUVA в образцах воды, которые были отобраны в точке водозабора ДВС и на выходе из очистных сооружений с января 2010 по март 2011 гг. (рис. 3)

ООУ, мгС/дм³



Месяц

UV₂₅₄, см⁻¹



Месяц

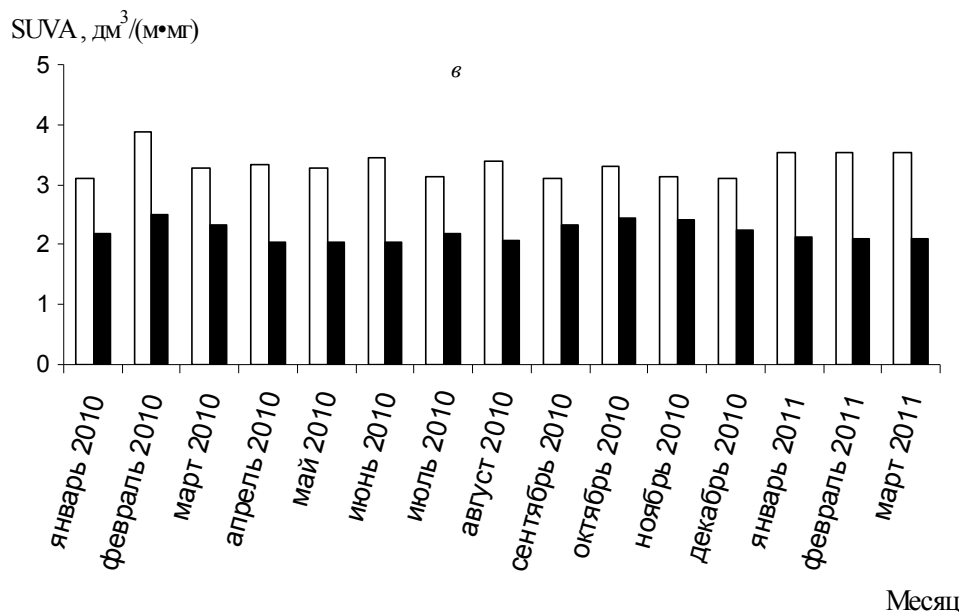


Рис. 3. Изменение величин ООУ (а), UV_{254} (б) и $SUVA$ (в) в воде р. Днепр с января 2010 по март 2011 гг.: □ – B1; ■ – B2.

Как видно из рис. 3, величина $SUVA$ в зимний период (февраль) достигает $4 \text{ дм}^3/(\text{м} \cdot \text{мг})$, а в остальное время года колеблется в пределах $3,0 - 3,5 \text{ дм}^3/(\text{м} \cdot \text{мг})$. Увеличение $SUVA$ в феврале обусловлено повышением величины UV_{254} и снижением содержания ООУ. Возрастание UV_{254} свидетельствует о повышении концентрации в воде ароматических соединений и веществ, содержащих хромофорные группы.

На рис. 4, 5 показано, что изменение цветности воды коррелирует с изменением величины ООУ.

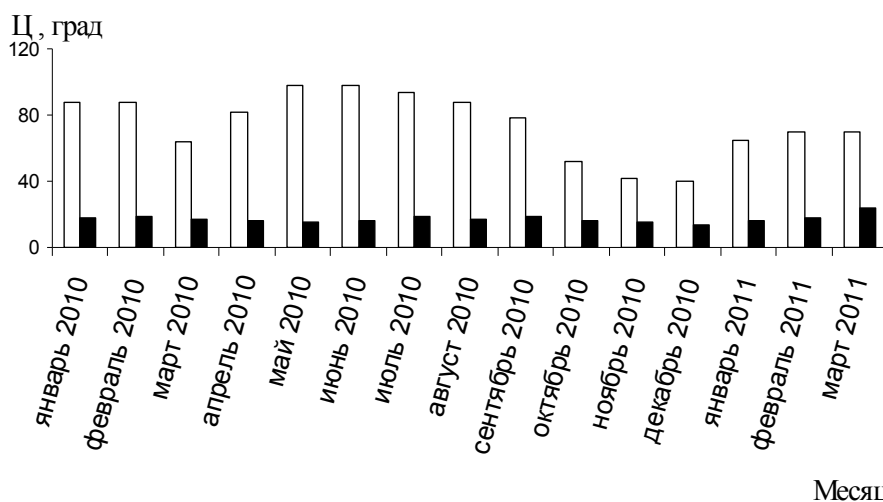


Рис. 4. Изменение цветности (Ц) воды р. Днепр с января 2010 по март 2011 гг.: □ – B1; ■ – B2.

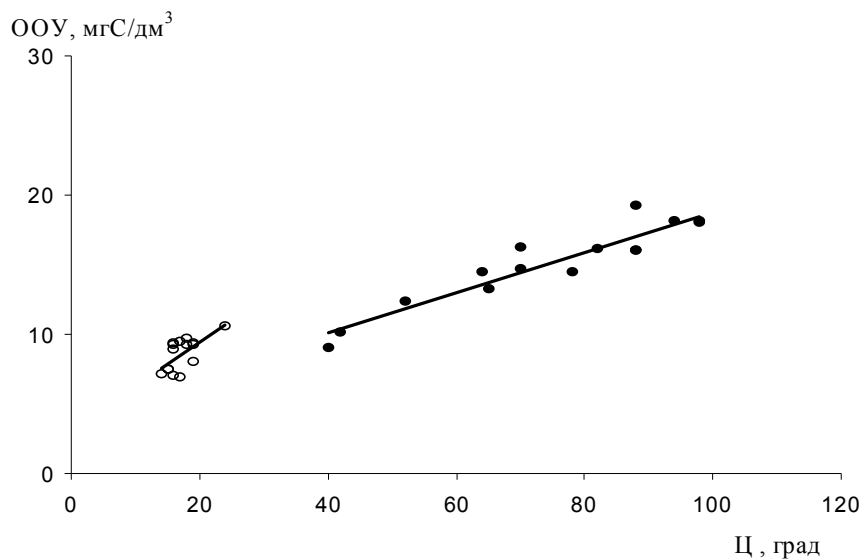


Рис. 5. Зависимость цветности воды р. Днепр от концентрации общего органического углерода с января 2010 по март 2011гг.: ● – B1; ○ – B2.

Как видно из рис. 6, корреляция между UV_{254} и ОУУ имеет четко выраженную пропорциональную зависимость для B1 ($R^2 = 0,98$) и B2 ($R^2 = 0,94$).

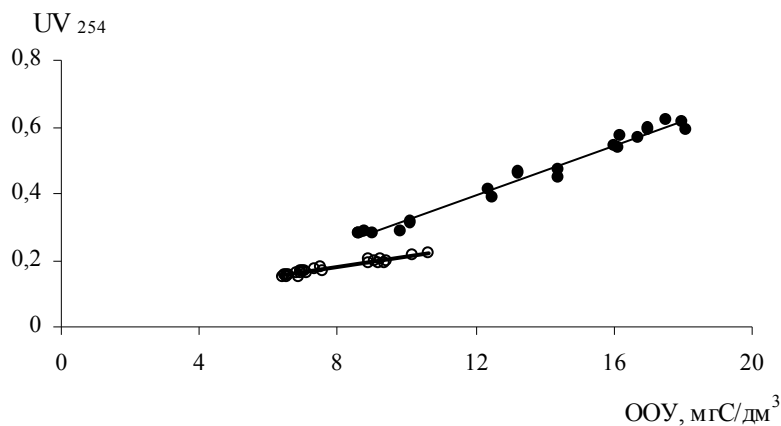


Рис. 6. Корреляция между показателями UV_{254} и ОУУ для воды р. Днепр (данные за 2010 – 2011 гг.): ● – B1; ○ – B2.

В днепровской воде в районе водозабора ДВС в состав ПОС входят как гумусовые, так и негумусовые соединения ($SUVA_{3,0} = 3,0 - 3,5$), и степень их удаления в процессе коагуляции по величине ОУУ в январе 2010 – марте 2011 гг. составляла 51 – 52 %, в летне-осенний сезон – 26 – 48 % и только в мае достигала 58 % (табл. 2). В зимние месяцы 2011 г. степень

удаления ООУ в процессе коагуляции снизилась.

Следует отметить, что четкой зависимости эффективности коагуляционной очистки воды от величины SUVA не наблюдалось. Судя по величине SUVA (3,0 – 3,5), в состав ПОС входят преимущественно гидрофильные соединения и некоторое количество гидрофобных. В процессе коагуляции, как и следовало ожидать, удаляются в основном гидрофобные соединения ароматического характера, что видно по снижению SUVA в резервуаре чистой воды (см. рис. 3) и снижению показателя UV_{254} (см. табл. 2). Таким образом, высокой степени удаления ПОС преимущественно гидрофильного характера и с относительно низкой молекулярной массой при существующем наборе технологических процессов водоподготовки получить не представляется возможным.

Таблица 2. Удаление ПОС из днепровской воды с января 2010 по март 2011 гг. по показателям ООУ, UV_{254} и SUVA

Дата	Степень удаления, %		
	ООУ	UV_{254}	SUVA
Январь 2010	51,7	66,1	29,7
Февраль 2010	50,0	68,0	36,0
Март 2010	52,0	66,0	28,7
Апрель 2010	43,1	64,8	38,2
Май 2010	58,6	74,0	37,3
Июнь 2010	47,9	69,2	41,0
Июль 2010	48,6	64,3	30,5
Август 2010	41,3	64,1	38,8
Сентябрь 2010	36,1	52,0	24,8
Октябрь 2010	32,5	58,4	26,6
Ноябрь 2010	26,0	43,2	23,0
Декабрь 2010	21,0	43,2	28,1
Январь 2011	32,4	59,2	39,7
Февраль 2011	33,3	60,3	39,0
Март 2011	34,5	61,1	37,9

Различие в степени удаления ПОС в процессе коагуляции в зимние месяцы 2010 – 2011 гг. обусловлено неодинаковым содержанием ООУ в воде и качественным составом его компонентов.

Достаточно высокая степень удаления ООУ в мае при его относительно низкой абсолютной величине в это же время и возрастании SUVA до 3,3 свидетельствует об увеличении в воде доли гидрофобных ароматических соединений. Изменения содержания ООУ, цветности и SUVA в

воде р. Днепр обусловлены сезонными явлениями. Уменьшение этих показателей в марте и ноябре связано с весенним и осенним паводком, а максимальные летние показатели – с уменьшением подземного водообмена и активным ростом фито- и зоопланктона.

Выводы. Таким образом, анализ приведенных данных по изменению характеристик и содержания ПОС в днепровской воде, отобранной в точке водозабора ДВС, в разные сезоны года показывает, что для воды в этом районе характерны средние значения величин SUVA и достаточно высокое содержание ООУ.

В состав ПОС входят как гидрофобные, так и гидрофильные соединения гумусового и негумусового характера, и степень их удаления в процессе коагуляции в летнее время при средних значениях SUVA 3,0 – 3,5 не превышает 26 – 48%. При этом вариации дозы коагулянта в указанный период мало влияют на степень извлечения ПОС. При возрастании величины SUVA в зимний период эффективность коагуляции возрастает. Таким образом, для повышения степени очистки днепровской воды от ПОС методом коагуляции необходимо определить рациональные условия коагулирования примесей этой воды путем сочетания окисления – коагуляции, подбора соответствующих коагулянтов и флокулянтов.

Авторы благодарны Иоанне Светлик (Department of Water Treatment Technology, Adam Mickiewicz University, Poznan, Poland) за предоставленную возможность определить молекулярно-массовое распределение ПОС методом эксклюзивной хроматографии.

Резюме. Оцінено зміну характеристик природних органічних речовин річки Дніпро (м. Київ) по сезонах року на основі визначення таких параметрів, як загальний органічний вуглець, поглинання в ультрафіолетовій області (UV_{254}), специфічна абсорбція (SUVA) і кольоровість. Показано, що в різні сезони року для води в цьому районі характерні середні значення величин SUVA і досить високий вміст загального органічного вуглецю.

*N. A. Klymenko, E.A. Samsoni-Todorova, L.A. Savchyna,
I.N. Lavrenchuk, T.N. Zasiad'ko*

SEASONAL VARIATIONS OF NATURAL ORGANIC MATTER IN DNIEPER RIVER WATER

Summary

Seasonal changes of natural organic matter characteristics of Dnieper River

(Kyiv) were estimated in terms of the definition of parameters such as total organic carbon, ultraviolet absorption (UV_{254}), specific absorption (SUVA) and color of water. It was shown that middle values of SUVA and sufficiently high content of total organic carbon are characterized in different seasons for water in this area.

Список использованной литературы

- [1] Гончарук В.В., Клименко Н.А., Савчина Л.А., Врубель Т.Л., Козятник И.П. // Химия и технология воды. – 2006. – **28**, №1. – С. 3 – 95.
- [2] Raczyk-Stanislawiak J., Swietlik J., Dabrowska A., Nawrocki J. // Water Res. – 2004. – **38**. – P. 1044 – 1054.
- [3] Ramseier M.K., Peter A., Traber J., von Gunten U. // Ibid. – 2011. – **45**. – P. 2002 – 2011.
- [4] Swietlik J., Raczyk-Stanislawiak U., Nawrocki J. // Ibid. – 2009. – **43**. – P. 463 – 473.
- [5] Matilainen A., Vepsalainen M., Sillanpaa M. // Adv. Colloid and Interface Sci. – 2010. – **159**. – P. 189 – 197.
- [6] Matilainen A., Lindqvist N., Korhonen S., Tuhkanen T. // Environ. Int. – 2002. – **28**. – P. 457 – 465.
- [7] Sharp E.L., Parsons S.A., Jefferson B. // Sci. Total Environ. – 2006. – **363**. – P. 183 – 194.
- [8] Sharp E.L., Parsons S.A., Jefferson B. // Environ. Pollut. – 2006. – **140**. – P. 436 – 443.
- [9] Smith E., Kamal Y. // Water Sci. and Technol.: Water Supply. – 2009. – **9**, N 2. – P. 191–198.
- [10] Fabris R., Chow C.W.K., Drikas M., Eikebrokk B. // Water Res. – 2008. – **42**. – P. 4188 – 4196.
- [11] Treguer R., Tatin R., Couvert A., Wolbert D. // Ibid. – 2010. – **44**. – P. 781 – 788.
- [12] Dojlido J., Zbiec E., Swietlik R. // Ibid. – 1999. – **33**. – P. 3111 – 3118.
- [13] Matilainen A., Lindqvist N., Korhonen S., Tuhkanen T. // Environ. Int. – 2002. – **28**. – P. 457 – 465.
- [14] Samios S., Kousouris L., Tzoumerkas P., Lekkas T., Golfopoulos S., Nikolaou A. // Desalination. – 2007. – **213**. – P. 253 – 262.
- [15] Ribas F., Frias J., Huguet J.M., Lucena F. // Water Res. – 1997. – **31**. – P. 639 – 649.
- [16] Uyak V., Toroz I. // J. Hazard. Materials. – 2007. – **141**. – P. 320 – 328.
- [17] Li F., Yuasa A., Chiharada H., Matsui Y. // J. Colloid and Interface Sci. – 2003. – **265**. – P. 265 – 275.
- [18] Wang D., Xing L., Xie J., Chow C.W.K., Xu Z., Zhao Y., Drikas M. // Chemosphere. – 2010. – **81**. – P. 39 – 45.
- [19] Wong H., Mok K.M., Fan X.J. // Desalination. – 2007. – **210**. – P. 44 – 51.

- [20] Yan M., Wang D., Ni J., Qu J., Chow C.W.K., Liu H. // Water Res. – 2008. – **42**. – P. 3361–3370.
- [21] Kim J., Chung Y., Shin D., Kim M., Lee Y., Lim Y., Lee D. // Desalination. – 2002. – **151**. – P. 1 – 9.
- [22] Pomes M.I., Larive C.K., Thurman M.R., Green R.W., Orem W.H., Rostad C.E., Coplan T.B., Cutak B.J., Dixon A.M. // Environ. Sci. and Technol. – 2000. – **34**. – P. 4278 – 4286.
- [23] Liang L., Singer P.C. // Ibid. – 2003. – **37**. – P. 2920 – 2928.
- [24] Serodes J.-B., Rodriguez M. J., Li H., Bouchard C. // Chemosphere. – 2003. – P. 253 – 263.
- [25] Fabris R., Lee E.K., Chow C.W.K., Chen V., Drikas M. // J. Membrane Sci. – 2007. – **289**. – P. 231 – 240.
- [26] Liu S., Lim M., Fabris R., Chow C., Drikas M., Amal R. // Organic Geochem. – 2010. – **41**. – P. 124 – 129.
- [27] Линник П.Н., Васильчук Т.А., Болелая Н.В. // Гидробиол. журн. – 1995. – **31**, № 2. – С. 74 – 81.
- [28] Archer A.D., Singer P.C. // J. Amer. Water Works Assoc. – 2006. – **98**, N 7. – P. 110 – 123.
- [29] Jacangelo J.G., DeMarco J., Owen D.M., Randtke S.J. // Ibid. – 1995. – **87**, N 1. – P. 65 – 77.
- [30] Hu J.Y., Wang Z.S., Ng W.J., Ong S.L. // Water Res. – 1999. – **33**. – P. 2587 – 2592.
- [31] Edzwald J.K., Becker W.C., Wattier K.L. // J. Amer. Water Works Assoc. – 1985. – **77**. – P. 122 – 131.
- [32] Archer A.D., Singer P.C. // Ibid. – 2006. – **98**, N 2. – P. 110 – 115.
- [33] Archer A.D., Singer P.C. // Ibid. – 2006. – **98**, N 8. – P. 97 – 103.
- [34] Szlachta M., Adamski W. // Water Sci. and Technol. – 2009. – **59**, N 10. – P. 1951 – 1957.
- [35] Sharp E.L., Jarvis P., Parsons S.A., Jefferson B. // Colloid Surf., A. – 2006. – **286**, N 1/3. – P. 104 – 111.
- [36] Hua G., Reckow D.A. // Environ. Sci. and Technol. – 2007. – **41**. – P. 3309 – 3315.
- [37] Гончарук В.В., Вакуленко В.Ф., Сова А.Н., Олейник Л.М., Швадчина Ю.О. // Химия и технология воды. – 2003. – **25**, №5. – С. 407 – 427.
- [38] Edzwald J.K., Tobiasson J.E. // Water Sci. and Technol. – 1999. – **40**. – P. 63 – 70.
- [39] Вода питьевая. Методы анализа. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1984. – 240 с.
- [40] Линник П.Н., Васильчук Т.А. // Гидробиол. журн. – 2001. – **37**, № 4. – С. 98 – 112.
- [41] Кульский Л.А. Теоретические основы и технология кондиционирования воды. – Киев: Наук. думка, 1980. – 564 с.
- [42] Buffle J. Complexation reactions in aquatic systems: An analytical approach. – New-York: Ellis Horwood Limited, 1988. – 692 p.