

УДК 504.054:556.531:519.876.5

**Е. В. Еременко**, д-р техн. наук, **В. С. Кресин**, канд. техн. наук  
(УкрНИИЭП)

## **СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ОБОБЩЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТОВ КАЧЕСТВА ВОДЫ ВОДОХРАНИЛИЩА**

*В статье представлено обобщение коэффициентов трансформации, используемых в экологической модели на примере Кременчугского водохранилища, с использованием данных натурных измерений.*

**Ключевые слова:** экологическая модель, качество воды, коэффициенты трансформации.

Экологические модели, описывающие формирование качества воды водохранилищ, основаны на уравнениях динамики течения и уравнениях переноса и трансформации веществ [1]. Именно последние дают информацию относительно изменений количественных показателей качества воды, так как учитывают не только характер течения, но и биохимические процессы, вызывающие трансформацию веществ, в том числе нормированных, их осаждение и взмучивание. Это позволяет при наличии данных измерений для конкретных условий обобщать их с целью идентификации в уравнениях зависимостей для расчета качества воды в разных условиях.

Целью работы является обобщение коэффициентов трансформации, используемых в экологической модели, на основе имеющихся данных натурных измерений на примере Кременчугского водохранилища. Первый этап расчетов состоит в определении функциональных зависимостей коэффициентов уравнений переноса и трансформации веществ при фиксированных характеристиках течения в виде их среднесезонных показателей для весны, лета и осени двух разных лет в шести камерах, на которые разделено водохранилище [2] (см. рис. 1). На последующих этапах работы предполагается выполнить прогнозные расчеты качества воды Кременчугского водохранилища с учетом полученных значений коэффициентов трансформации. Настоящая работа является завершением первого этапа исследований.

С учетом того, что для рассматриваемого водохранилища лимитирующим биохимических процессов является азот, а наибольший вклад в массу органического вещества вносит фитопланктон [3, 4], использовалась схема взаимосвязи компонент (рис. 2), соответствующая системе уравнений (1-8) для каждой камеры модели,

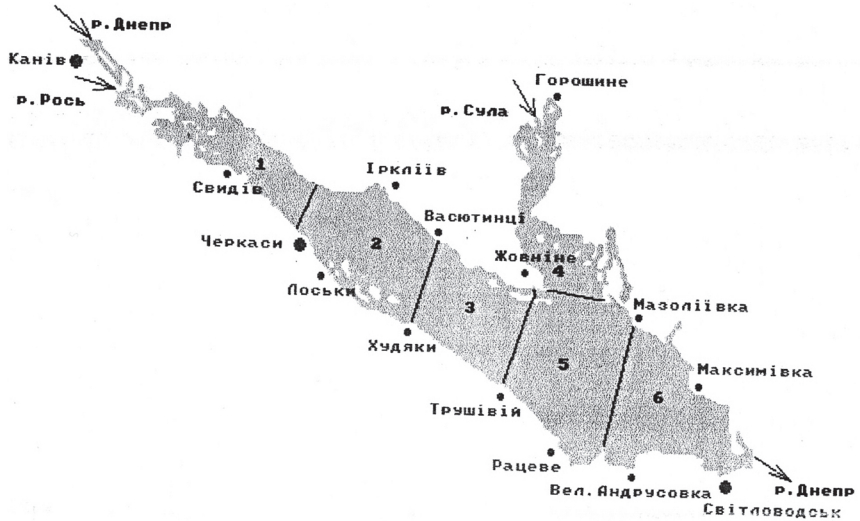


Рис. 1. Схема Кременчугского водохранилища с выделением отдельных расчетных камер (1-6 — расчетные камеры).

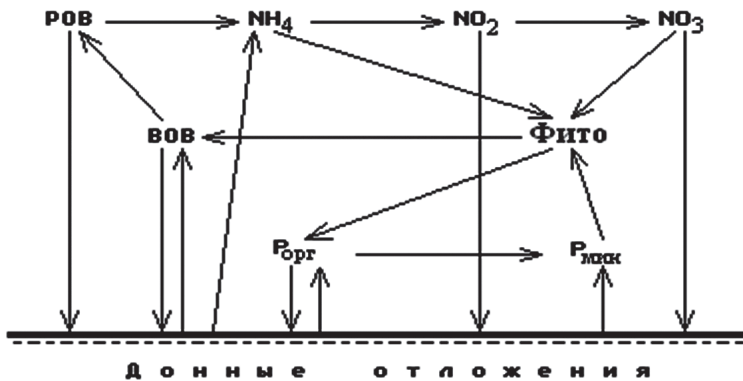


Рис. 2. Схема взаимосвязи компонент экологической модели.

учитывающей восемь компонент: аммонийный азот ( $NH_4 - N_1$ ), нитритный азот ( $NO_2 - N_2$ ), нитратный азот ( $NO_3 - N_3$ ), фитопланктон ( $Фито - N_4$ ), взвешенное органическое вещество ( $BOB - N_5$ ), растворенное органическое вещество ( $POB - N_6$ ), фосфор органический ( $P_{opz} - P_1$ ) и минеральный ( $P_{мин} - P_2$ ); исходя из задач исследования на данном этапе, принято, что концентрация растворенного кислорода в потоке обеспечивает  $БПК_{полн}$  [2].

$$\frac{dN_1}{dt} = k_t k_{17} N_7 - k_t k_{21} N_1 - k_f \bar{k}_t \mu_{41} \left( \frac{N_1}{k_{s41} + N_1} \right) N_4 + f_1; \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = k_t k_{21} N_1 - k_t k_{32} N_2 + f_2; \quad (2)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = k_t k_{32} N_2 - k_f \bar{k}_t \mu_{43} \left( \frac{N_3}{k_{s43} + N_3} \right) N_4 + f_3; \quad (3)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = k_f \bar{k}_t \left[ \mu_{41} \frac{N_1}{k_{s41} + N_1} + \mu_{43} \frac{N_3}{k_{s43} + N_3} \right] N_4 - \bar{k}_t k_{64} N_4 + f_4; \quad (4)$$

$$\frac{dN_6}{dt} = \bar{k}_t k_{64} N_4 - k_t k_{76} N_6 - k_{cd} (N_6 - k_{cn} S_p) + f_6; \quad (5)$$

$$\frac{dN_7}{dt} = k_t k_{76} N_6 - k_t k_{17} N_7 + f_7; \quad (6)$$

$$\frac{dP_1}{dt} = p_n \bar{k}_t k_{64} N_4 - k_t k_{21p} P_1 - k_{cp} k_{cd} (N_6 - k_{cn} S_p) + f_{1p}; \quad (7)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = k_t k_{21p} P_1 - p_n k_f \bar{k}_t \left[ \mu_{41} \frac{N_1}{k_{s41} + N_1} + \mu_{43} \frac{N_3}{k_{s43} + N_3} \right] N_4 + f_{pa}; \quad (8)$$

где  $\mu_{41}$ ,  $\mu_{43}$ ,  $k_{64}$  — экологические коэффициенты максимальной скорости роста и отмирания, 1/сут.;  $k_{s41}$ ,  $k_{s43}$  — экологические коэффициенты полунасыщения, гN/м<sup>3</sup>;  $k_{17}$ ,  $k_{21}$ ,  $k_{32}$ ,  $k_{76}$ ,  $k_{21p}$  — коэффициенты трансформации, 1/сут.;  $f_i = \varphi_i - (Q/W)N_i$ ;  $Q$  — расход воды в стоке из камеры, м<sup>3</sup>/сут.;  $W$  — объем воды в камере, м<sup>3</sup>;  $\varphi_i$  — интенсивность внешнего источника  $i$ -той компоненты, г/м<sup>3</sup>/сут.;  $k_{cd}$  — коэффициент седиментации, 1/сут.,  $k_{cd} = u/H$ ;  $u$  — гидравлическая крупность

взвесей, м/сут.;  $H$  — средняя глубина камеры, м;  $k_f$  — коэффициент освещенности с учетом самозатемнения;  $k_p, \bar{k}_p$  — температурные коэффициенты соответственно для «неживых» и «живых» компонент, зависящих от температуры  $T$  воды в камере;  $S_p$  — равновесная концентрация взвесей, г/м<sup>3</sup> [5];  $k_{cp}$  — коэффициент связи между фосфором и азотом, который принимает участие в процессах осаждения-взмучивания ВОВ;  $k_{cn}$  — коэффициент пропорциональности между концентрациями органического вещества и взвесей, гN/г;  $p_n$  — отношение удельного содержания фосфора к удельному содержанию азота в сухом органическом веществе фитопланктона, гP/гN.

Приведенная система уравнений решалась методом Рунге — Кутты — Мерсона [6] с построением алгоритмов и программ расчета среднесезонных значений компонент модели по камерам. Идентификации коэффициентов модели выполняются с помощью данных натурных измерений концентраций компонент в Кременчугском водохранилище [7, 8, 9, 10] за вегетационные периоды 1982 и 1985 гг., которые были обобщены по сезонам.

Первые восемь компонент, основные обобщения и полученные зависимости для первых пяти камер показаны на примере камеры 5 в работе [2]. Дополнительно рассмотрены оставшиеся для этих камер зависимости коэффициентов  $k_{cn}$  и  $k_{cp}$ , учитывающие соответственно влияние процессов осаждения-взмучивания на концентрацию взвешенного органического вещества и содержание в нем органического фосфора. Также рассмотрено уравнение для  $BPK_{ном}(L)$  с целью определения зависимостей входящих коэффициентов, что необходимо для полноты учета факторов в рассматриваемой экологической модели:

$$\frac{dL}{dt} = c_n \bar{k}_i k_{64} N_4 - k_i k_c L - k_{cd} (L - k_{cl} S_p) + f_b \quad (9)$$

где  $N_4$  — концентрация азота фитопланктона, гN/м<sup>3</sup>;  $k_{64}$  — коэффициент скорости отмирания фитопланктона, 1/сут.;  $c_n$  — кислородный эквивалент удельного содержания азота в сухом органическом веществе — фитопланктоне, гO<sub>2</sub>/гN;  $k_c$  — коэффициент трансформации (фактически балансирующий потребление кислорода внутриводными процессами);  $k_{cl}$  — коэффициент пропорциональности между концентрацией органического вещества в кислородных единицах

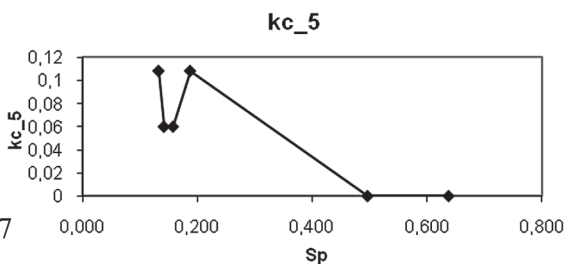
и концентрацией взвесей,  $\text{гO}_2/\text{г}$ , учитывает влияние процессов осаждения-взмучивания.

Оставшиеся неопределенными коэффициенты группы [2] для первых пяти камер были идентифицированы и в качестве примера, как и прежде, приводятся по камере 5 (табл. 1). Общее количество коэффициентов второй группы экологической модели для одной камеры равно 11. Анализ обобщения показал, что 10 из них могут быть представлены зависимостями от равновесной концентрации взвесей  $S_p$  ( $\text{г}/\text{м}^3$ ), один коэффициент  $k_{cn}$  (связанный с процессами осаждения-взмучивания) — от средней скорости течения ( $\text{м}/\text{с}$ ).

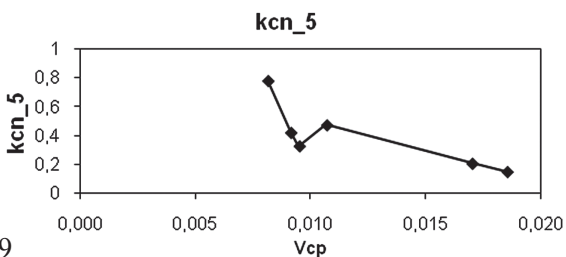
Камера 6 водохранилища (рис. 1) является замыкающей и, естественно, течение в ней наиболее чувствительно к регулированию водоотведения, которое сопровождается образованием неустановившегося движения потока. Так как рассматриваются среднесезонные показатели течения и концентраций веществ, естественным остается вопрос о возможности наиболее выразительного для водохранилища влияния неустановившегося движения потока в этой камере на приятную систематизацию и обобщение коэффициентов.

### 1. Значения дополнительных коэффициентов трансформации по камере 5

$S_p$	$kc_5$
0,133040	0,108
0,14238	0,06
0,15813	0,06
0,18799	0,108
0,49665	0,0003
0,63776	0,0003
$r^* =$	$-0,86397$



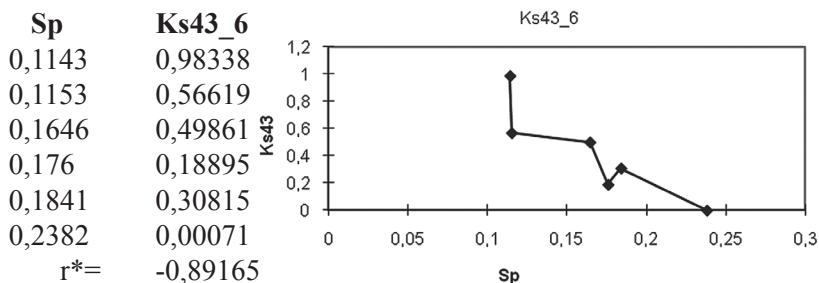
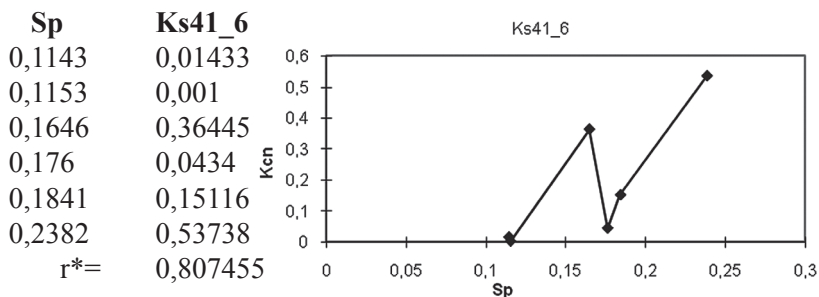
$V_{cp}$	$kcn_5$
0,008161	0,779
0,009153	0,4203
0,009519	0,3275
0,01071	0,473
0,01703	0,2066
0,01855	0,1493
$r^* =$	$-0,80489$





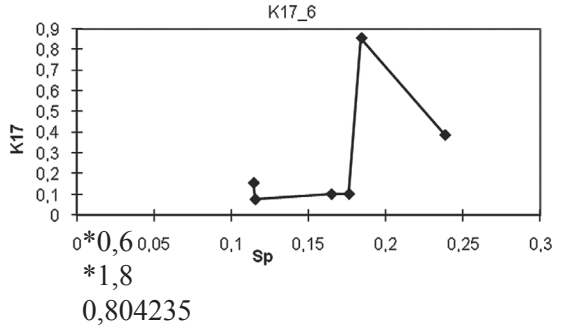
Вторая группа связана с коэффициентами трансформации веществ, в которую входят экологические коэффициенты полунасыщения  $k_{s41}$  и  $k_{s43}$ , регулирующие потребление фитопланктоном питательных веществ (аммонийный и нитратный азот), веществ, переносимых водным потоком  $k_{17}$ ,  $k_{21}$ ,  $k_{32}$ ,  $k_{76}$ ,  $k_{21p}$ ,  $k_c$ , с учетом процессов осаждения-взмучивания  $k_{cn}$ ,  $k_{cp}$ ,  $k_{cl}$ . Результаты определения коэффициентов второй группы для камеры 6 приведены в табл. 3, содержащей значения и графики всех 11 коэффициентов второй группы. Из таблицы следует, что 9 коэффициентов из 11 соответствуют зависимостям предыдущих камер; исключение составляют два коэффициента —  $k_{17}$  и  $k_{cp}$ . Коэффициент  $k_{17}$  является коэффициентом трансформации в водном потоке растворенного органического вещества в аммонийный азот,  $k_{cp}$  учитывает влияние процессов осаждения-взмучивания на трансформацию взвешенного органического вещества в органический фосфор. Зависимости этих коэффициентов значительно не достигают требуемого значения коэффициента корреляции ( $r^* \geq 0,8$ ) [11]. На примере коэффициента  $k_{17}$  показано, какие

### 3. Значения коэффициентов трансформации по камере 6

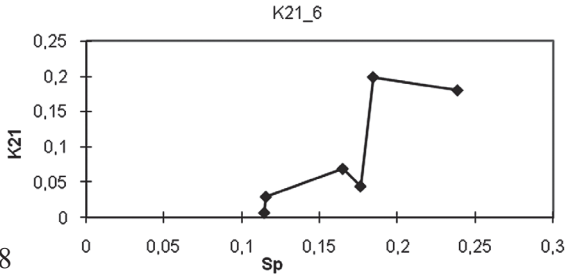


Продолжение табл. 3

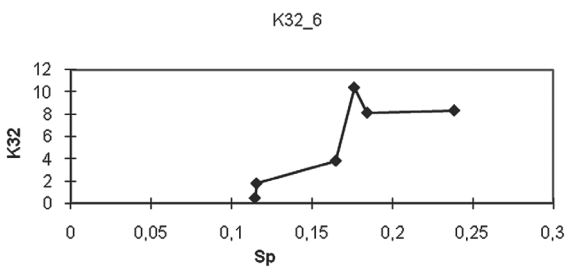
Sp	K17_6
0,1143	0,15596
0,1153	0,07628
0,1646	0,10146
0,176	0,10227
0,1841	0,85496
0,2382	0,38721
r*= 0,470242	0,804235



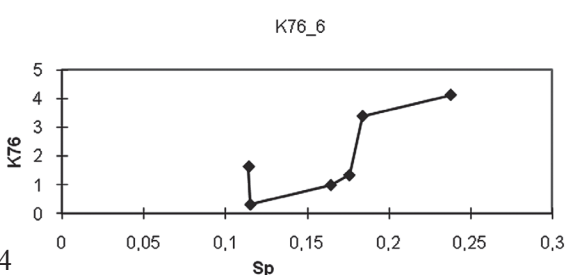
Sp	K21_6
0,1143	0,00714
0,1153	0,02972
0,1646	0,06918
0,176	0,0445
0,1841	0,19839
0,2382	0,17986
r*= 0,812748	



Sp	K32_6
0,1143	0,4889
0,1153	1,799
0,1646	3,821
0,176	10,376
0,1841	8,124
0,2382	8,327
r*= 0,80171	



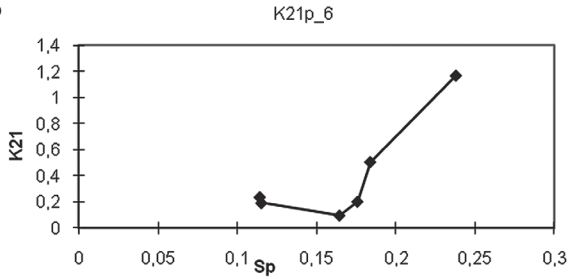
Sp	K76_6
0,1143	1,6393
0,1153	0,32692
0,1646	1,0018
0,176	1,341
0,1841	3,386
0,2382	4,1162
r*= 0,806904	



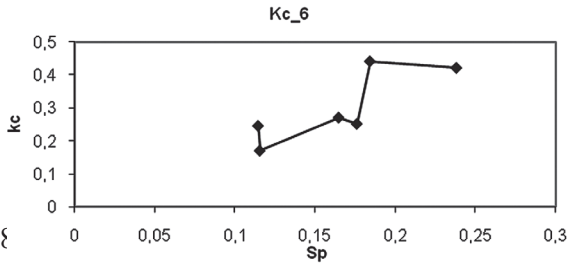


Продолжение табл. 3

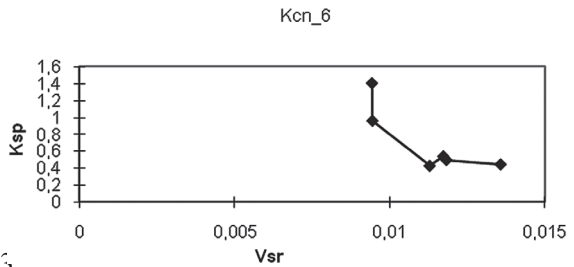
Sp	K21p_6
0,1143	0,2385
0,1153	0,193
0,1646	0,0973
0,176	0,2039
0,1841	0,508
0,2382	1,171
r*= 0,80052	



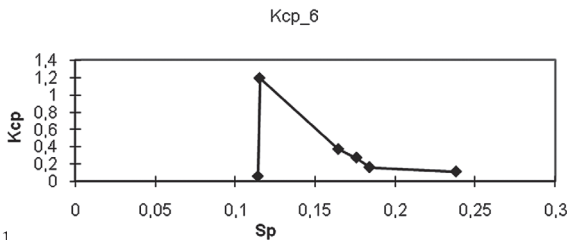
Sp	Kc_6
0,1143	0,245
0,1153	0,17
0,1646	0,27
0,176	0,251
0,1841	0,44
0,2382	0,42
r*= 0,808708	



Vcp	Kcn_6
0,00945	1,4027
0,00946	0,9611
0,0113	0,4311
0,01174	0,54231
0,01184	0,49941
0,01358	0,44799
r*= -0,82013	

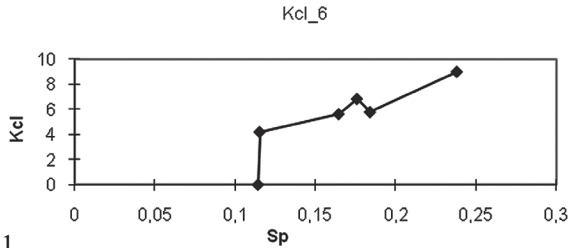


Sp	Kcp_6
0,1143	0,056
0,1153	1,19
0,1646	0,37
0,176	0,272
0,1841	0,161
0,2382	0,111
r*= -0,49601	



Окончание табл. 3.

Sp	Kcl_6
0,1143	0,01
0,1153	4,18
0,1646	5,6
0,176	6,8
0,1841	5,755
0,2382	8,945
$r^* =$	0,879881



корректирующие множители необходимы для достижения требуемого значения коэффициентов корреляции, но такие изменения коэффициентов трансформации существенно влияют на точность расчета концентраций компонент модели, которая установлена на уровне  $\pm 20\%$ , а для баланса азота в компонентах по камерам —  $\pm 2,0\%$ .

Этот результат показывает необходимость проведения моделирования формирования качества воды с учетом неустановившегося движения водного потока для возможности корректировки зависимостей указанных коэффициентов по камере б. Более того, такое рассмотрение даст возможность оценить используемый подход обобщения и систематизации коэффициентов экологической модели и найденных коэффициентов для реальных условий формирования качества воды в неустановившемся потоке водохранилища. В этом заключается цель дальнейших исследований.

1. Еременко Е. В. Экологические модели разной сложности для прогнозирования качества воды / Е. В. Еременко // Сб. науч. тр. УкрНИИЭП. — Харьков, 2000. — С. 90-99.
2. Еременко Е. В. Обобщение коэффициентов экомодели для повышения точности расчетов качества воды водохранилища / Е. В. Еременко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2012. — С. 57-61.
3. Каскад Днепровских водохранилищ / Под ред. М. С. Каганера. — Л.: Гидрометеиздат, 1976. — 348 с.
4. Новиков Б. И. Донные отложения Днепровских водохранилищ / Б. И. Новиков. — К.: Наукова думка, 1985. — 172 с.
5. Караушев А. В. Теория и методы расчета речных наносов / А. В. Караушев. — Л.: Гидрометеиздат, 1977. — 272 с.

6. Годунов С. К. Разностные схемы / С. К. Годунов, В. С. Рябенский. — М.: Наука, 1973. — 400 с.
7. Государственный водный кадастр : Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. — 1982. — Часть 2. — Т. II. — Вып. 2. — К.: УкрУгкс, 1984.
8. Государственный водный кадастр : Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. — 1985. — Часть 2. — Т. II. — Вып. 2. — К.: УкрУгкс, 1987.
9. Гидрохимический бюллетень (материалы наблюдений за загрязненностью поверхностных вод на территории УССР) : Киев, апрель-июнь 1982 г., июль-сентябрь 1982 г., октябрь-декабрь 1982 г. — К.: Госкомгидромет УССР, 1982.
10. Гидрохимический бюллетень (материалы наблюдений за загрязненностью поверхностных вод на территории УССР) : Киев, апрель-июнь 1985 г., июль-сентябрь 1985 г., октябрь-декабрь 1985 г. — К.: Госкомгидромет УССР, 1985.
11. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е. Н. Львовский. — М.: Высш. школа, 1982. — 224 с.

**Єременко Є. В., Кресін В. С. СИСТЕМАТИЗАЦІЯ УЗАГАЛЬНЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ЕКОЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ РОЗРАХУНКІВ ЯКОСТІ ВОДИ ВОДОСХОВИЩА**

*У статті представлено узагальнення коефіцієнтів трансформації, що використовуються в екологічній моделі на прикладі Кременчуцького водосховища, з використанням даних натурних вимірювань.*

**Ключові слова:** екологічна модель, якість води, коефіцієнти трансформації.

**Yeremenko Ye. V., Kresin V. S. SYSTEMATICS SUMMARY OF ENVIRONMENTAL COEFFICIENT MODELS FOR INCREASING THE ACCURACY OF PAYMENT WATER QUALITY RESERVOIR**

*The article presents a synthesis of the transformation coefficients used in the ecological model, an example of the Kremenchug reservoir, using field measurement data.*

**Key words:** ecological model, water quality, transformation ratios.