

УДК 004.942+574.51

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.24

## ПРИБЛИЖЕННАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОБЪЕМА ЗАИЛЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩА – ПРОТОТИПА

**Д. Д. ДУБОВИК**

*Институт технической механики и государственное космическое агентство НАН Украины, Днепропетровск, УКРАИНА.  
\*email: denic3d@gmail.com*

**АННОТАЦИЯ** Анализ состояний больших водоемов важно для общей оценки состояния водоемов. Использование зональных характеристик, информационных технологий, баз данных, позволяет отобразить реальное состояние водоемов. В связи с этим при прогнозировании экологического состояния водохранилища по ограниченной группе экологических показателей можно использовать данные прототипа для исследуемого или проектируемого водохранилища (аналога), которое находится в геосистеме близкой по характерным показателям к геосистеме аналога.

**Ключевые слова:** геосистема, прототип, инфинитезимальное решение, интервал стабильности.

## APPROXIMATE METHOD ESTIMATE OF THE VOLUME OF RESERVOIR SEDIMENTATION – PROTOTYPE

**D. DUBOVYK**

*Institute of engineering mechanics and state space Agency of NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, UKRAINE.*

**ANNOTATION.** Model the prototype can serve as a well-studied body of water or specially created hydraulic structure, so arranged that the entrance was formed by such processes that reflect the processes in the reservoir, which requires the prediction of certain processes, e.g., processes of sedimentation. Analysis of the conditions of the big reservoirs important for an overall assessment of state water bodies. Using zonal characteristics, information technology, database data allows display real status of water bodies. On the basis of reservoir in predicting environmental status for a limited group of environmental indicators can be used for the test of the prototype data or the projected reservoir (analogue), which is in close geosystem the characteristic parameters to geosystem analog. This technique allows to carry out assessments of mol at a predetermined time interval on the basis of experimentally measured specific values of settling of suspensions in water of the reservoir from a known volume of water. The accuracy of estimates is determined by the accuracy of determining the specific amount of precipitation deposited per unit time from the volume of water used. The results will be more accurate, the more accurate will be executed zonal division of the reservoir in determining the quantities of the deposited substances from the respective zones of artificial reservoir.

**Keywords:** geosystem, prototype solution infinitesimal interval of stability.

### Введение

В природопользовании объекты исследования описываются сложными зависимостями природного и социально-экономического характера. В связи с этим при анализе экологических систем часто используют логические методы, которые устанавливают связи между объектами. При системном анализе к числу логических относят методы индукции, дедукции, экспертных оценок и аналогии.

### Постановка задачи

Метод аналогий чаще всего применяют при разработке локальных прогнозов. Так, при прогнозировании экологического состояния водохранилища по ограниченной группе экологических показателей можно использовать данные прототипа для исследуемого или проектируемого водохранилища (аналога), которое находится в геосистеме близкой по характерным показателям к геосистеме аналога.

Моделью-прототипом может служить хорошо изученный водоем или специально созданное гидротехническое сооружение, оборудованное таким образом, чтобы на входе формировались такие процессы, которые отражают процессы в водохранилище, которое нуждается в прогнозе тех или иных процессов, например, процессов заиления. Для выбора значений настраиваемых параметров должны использоваться специально разработанные критерии подобия. В качестве таких критериев могут быть использованы различные относительные характеристики, которые являются ключевыми при исследовании конкретной локальной задачи, соответствующих процессов, протекающих в водохранилище в условиях конкретной геосистемы, включающей водоем, водосборный бассейн,

Оценка процессов заиления требует проведения большого объема различных расчетов: балансовых расчетов (энергии и вещества), характеризующих структуру природных комплексов меньшего ранга (аквасистем, зон, участков, биотопов); разработку моделей (гидравлических, гидрологических); оценки степени антропогенного

воздействия на водоем (внесение вещества в водоем); оценки динамики водоема (путем сравнения результатов измерений, полученных в разные годы). Применение методики изучения седиментационного материала водохранилищ предполагает получение большого количества информации, связанной с оценкой притока наносов из вышерасположенного водохранилища, измерений мутности воды, оценку склонового смыва, вычисление продуктов эолового переноса, отступление берега водохранилища и др. Такой значительный объем работы не всегда может быть практически реализован даже для моделей прототипов.

Второй путь состоит в приближенной оценке объемов наилка в водоеме – прототипе, оседающего на дно ИВ в течение заданного интервала времени. Для этой цели осуществляется зональное разбиение территории водохранилища, которое позволяет вычислить зональные объемы воды с одной стороны и экспериментально определить количество осаждаемого вещества из удельного объема каждой зоны в единицу времени на характерном интервале времени по количеству осадков (сезон, месяц, неделя). Используя модель динамики осадения, можно определить интегральное количество осаждаемого вещества на заданном интервале времени, интегрируя по времени и суммируя объемы осадка по зонам.

При разработке модели динамики заиления в качестве исходных данных будем считать известными контур береговой линии ИВ и профили его донной поверхности. Расчеты привязаны к актуальному уровню поверхности водоема, обычно НПУ. Поэтому в качестве исходных точек отсчета используем данные, соответствующие НПУ [1-4].

Всю директивную поверхность ИВ разобьем аппроксимирующими сечениями на  $2N$  элементарных сечений, каждому из которых соответствует элементарный объем. Каждый элементарный объем  $V_i (i=1, 2N)$  определяется произведением площади  $S_i$   $i$ -го сечения на длину  $l_i$  (вдоль берегов линии вниз по течению), на которой площади сечения приближенно считается постоянной. Площади  $S(l)$  изменяются над полусегментами  $l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_{2N}$  и принимают значения  $S_i(l)$ . Если

$S_i = const$  над  $l_i$ , то  $S = S_i$  при  $l \leftarrow l_i$ .  $\sum_{i=1}^{2N} l_i = L$ , где

$L$  длина береговой линии, подвергнутая разбиению аппроксимирующей дискретизации. Дискретные элементы длины  $l_i (i=1, 2, \dots, 2N)$  определены следующим образом:

$$l_1 = \{l: l_{11} \leq l \leq l_{12}\} \quad l_2 = \{l: l_{21} \leq l \leq l_{22}\} \quad \dots \quad l_{12} = l_{21} \dots$$

где  $l_{11}, l_{12}$  – границы интервалов  $l_i$ . Площадь сечений  $S_i$  – непрерывные функции длины на интервалах их определения.

С учетом этих определений приближенное выражение для объема водохранилища  $V_n$ , включающего  $n$  элементарных объемов будет иметь вид:

$$V_n = S_n(l_{n2} - l_{n1}) + \dots + S_i(l_{i2} - l_{i1}) + \dots + S_1(l_{12} - l_{11}). \quad (1)$$

Если помнить  $l_{11} = 0$ ,  $l_{(n-1)2} - l_{(n-1)1} = l_{i2} - l_{i1} = \Delta l_i$ , тогда

$$V_n = \sum_{i=1}^n S_i \Delta l_i. \quad (2)$$

Для определения площади сечения  $S_i$  используем методику, основанную на вероятностном подходе (метод Монте-Карло).

Для этой цели впишем сечение водоема в прямоугольник в соответствии с рис. 1.

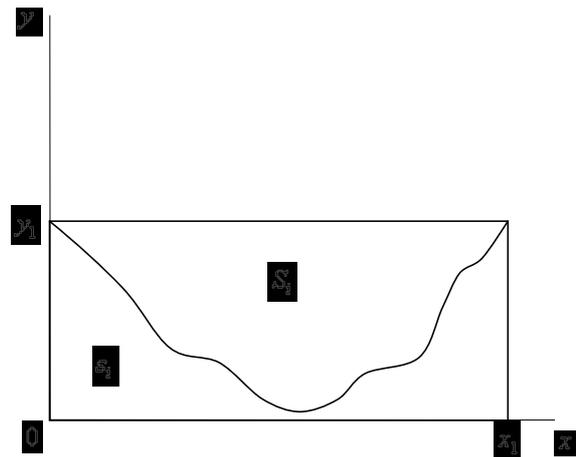


Рис.1 Определение площади сечения ИВ.

Обозначим  $S_i$  площадь описанного прямоугольника. Очевидно:

$$S_i = x_i y_i \quad (3)$$

Используем таблицу случайных чисел для генерации пар чисел  $R$  и  $G$  равномерно распределенных в интервале от 0 до 1. Число  $R$  будет имитировать координату  $x (0 \leq x \leq x_1)$ , число  $G$  будет имитировать координату  $z (0 \leq z \leq z_1)$ .

Статистически гипотеза заключается в том, что количество точек в описанном прямоугольнике  $K_i$  с площадью  $s_i$ , попавших в контур сечения  $k_i$  пропорциональны площади  $S_i$ , то есть

$$k_i / S_i = \frac{K_i}{s_i}, \quad (4)$$

Откуда следует



$\bar{V}_i(t)$  – оценка действий неучтенных факторов на соответствующие компоненты оседаемой массы.

Элементы матрицы  $A_i$  в общем случае непрерывные функции времени на интервалах их определения  $\theta_i$ . Решение этой системы можно искать методом приспособывания или его обобщением с использованием мультипликативных интегралов [9-11].

Рассмотрим случай отсутствия действий неучтенных факторов, то есть положим  $\bar{V}_i(t) = 0$ . Возьмем первые  $n$  уравнений системы (1), тогда квадратная матрица  $X_i$  – матрица системы (1), соответствующий первым  $n$  уравнениям системы ( $n$  зон на различных интервалах  $\theta_j$ ) и начальными условиями  $X_i(0) = E$ .

Разобьем полусегмент  $(t_0, t_k)$  на  $k$  элементов точкам  $t_r (r = 0, 1, \dots, k)$ . Над введенными таким образом элементами определим матрицы  $X_i^{(r)}$ .

Запишется следующим образом [12-13].

$$X_{t_0}^{t_k} = X_{t_{k-1}}^{t_k} \dots X_{t_2}^{t_3} X_{t_0}^{t_1}. \quad (9)$$

В силу малости элементов  $\Delta t_r = t_r - t_{r-1}$  матрицу коэффициентов можно считать постоянной над каждым  $r$ -ым элементом. При этом матрица  $X_{t_{r-1}}^{t_r}$  как решение системы дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами имеет вид

$$X_{t_{r-1}}^{t_r} = e^{A_r \Delta t_r}. \quad (10)$$

Разложив правую часть этого равенства в матричный ряд Тейлора, отбросив члены ряда, имеющие порядок малости выше первого и подставив в (2), получим:

$$X_{t_0}^{t_k} = (E + A_k \Delta t_k) \dots (E + A_2 \Delta t_2) \cdot (E + A_1 \Delta t_1). \quad (11)$$

Предел этого бесконечного произведения при  $\Delta \rightarrow 0$  по определению является мультипликативным интегралом [8]:

$$\int_{t_0}^{t_k} (E + A dt) = \lim_{\Delta t_r \rightarrow 0} (E + A_k \Delta t_k) \dots (E + A_1 \Delta t_1) \quad (12)$$

Используя обозначение начального времени  $t_{j,j-1} = t_0$ , запишем выражение, связывающее значение вектора  $\bar{X}$  в начале и конце интервала  $\Delta t$ :

$$\bar{x}^j = \left\{ \int_{t_{j-1}}^{t_j} (E + A_{j_i} dt) \right\} \bar{x}^{j-1} \quad (13)$$

здесь  $x^j = x(t = t_j)$ .

Пользуясь свойствами мультипликативного интеграла, объединим  $n$  интервалов  $\Delta t$  и получим выражение, связывающее значения вектора  $\bar{x}$  в

начале и конце  $j$ -го интервал  $T_j$  ( $j$ -го полусегмента оси времени  $\theta_j$ ):

$$\bar{x}^j = \left\{ \prod_{i=1}^n \int_{t_{j-1}}^{t_j} (E + A_{j_i} dt) \right\} \bar{x}^{j-1}, \quad (14)$$

где  $\bar{x}^{j-1}, \bar{x}^j$  – значения вектора  $\bar{x}$  соответственно в начале и конце интервала времени  $T_j$ .

Для последовательности  $m$  интервалов, пронумерованных в порядке  $j = 1, 2, \dots, m$ , получим выражение

$$\bar{x}^m = \left\{ \prod_{j=1}^m \prod_{i=1}^n \int_{t_{j-1}}^{t_j} (E + A_{j_i} dt) \right\} \bar{x}^0, \quad (15)$$

где  $\bar{x}^0$  – значение вектора  $\bar{x}$  в начале периода  $T_1$ .

Выражение (14) содержит мультипликативный интеграл, на основе которого построено инфинитезимальное исчисление. Решение (14) поэтому называют инфинитезимальным. Такое решение удобно использовать для кусочно-линейных систем, особенно для систем кусочно-постоянных, которым в периоды стабильности соответствует состояние ИВ. Использование такого решения предполагает знание постоянных матриц  $A_i$ , которые определяют распределение различных составляющих оседающей массы в соответствующих зонах (условиях) ИВ. Эти значения определяются на основе лабораторного анализа проб воды, взятых в соответствующих зонах ИВ и в соответствующие периоды времени [9].

Если  $\bar{v}(t) \neq 0$ , то значение вектора  $\bar{x}$  на  $r$ -ом интервале времени имеет вид

$$\bar{x}^r = \bar{x}(t_r) = X_r^t(A) \bar{x} \left[ t_{r-1} + \int_{t_{r-1}}^{t_r} k(t_0, \tau) \bar{v}(\tau) d\tau \right]. \quad (16)$$

Здесь  $k(t_0, \tau)$  – матрица Коши,  $(k(t_0, \tau) = X(A)_{t_0}^t [X_{t_0}^{\tau}(A)]^{-1})$ . Подставив в (10) выражение для  $\bar{x}(t_{r-1})$ , а в  $\bar{x}(t_{r-1})$  выражение  $\bar{x}(t_{r-2})$  и т.д., получим

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{x}^r &= \prod \bar{x}(t_0) + \prod_{r-1} J^1 + \prod_{r-2} J^2 + \dots + \prod_2 J^{r-2} + \prod_1 J^{r-1} + J^r \\ &\text{где } \prod_r = X_{t_{r-1}}^{t_r} \dots X_{t_0}^{t_1}; \\ &\quad \prod_{r-1} = X_{t_{r-1}}^{t_r} \dots X_{t_1}^{t_2}; \\ &\dots\dots\dots \\ &\quad \prod_1 = X_{t_{r-1}}^{t_r}; \\ J_1 &= \int_{t_{r-1}}^{t_r} k(t_1, \tau) \bar{v}(\tau) d\tau, \dots, J^r = \int_{t_{r-1}}^{t_r} k(t_r, \tau) \bar{v}(\tau) d\tau. \end{aligned} \right. \quad (17)$$

Используя понятие мультипликативного интеграла, выражение (11) запишем в виде:

$$x = \left[ \int_{t_0}^{t_r} (E + Adt) \right] x(t_0) + \int_{t_0}^{t_r} (E + Adt) \int_{t_0}^{t_1} k(t_1, \tau) \bar{v}(\tau) d\tau + \dots + \int_{t_{r-1}}^{t_r} (E + Adt) \int_{t_{r-1}}^{t_r} k(t_{r-1}, \tau) \bar{v}(\tau) d\tau. \quad (18)$$

Здесь  $k(t_r, \tau) = X_{t_{r-1}}^{t_r} [X_{t_{r-1}}^{\tau}]^{-1}$ .

Данная методика позволяет провести оценки объемов наилка на заданном интервале времени на основе экспериментально измеренных удельных значений оседающих взвесей в воде водоема из известного объема воды. Точность оценок определяется точностью определения объема удельных осадков осаждаемых в единицу времени из использованного объема воды. Результаты будут тем точнее, чем точнее будет выполнено зональное деление водоема при определении количеств осаждаемого вещества из соответствующих зон ИВ.

### Список литературы

1. Матарзин, Ю. М. Вопросы морфометрии и районирования водохранилищ / Ю. М. Матарзин, И. К. Мацкевич // *Вопросы формирования водохранилищ и их морфометрия*. Пермь: Изд-во Перм.ун-та. – 1970. – 92 с.
2. Матарзин, Ю. М. Гидрологические процессы в водохранилищах / Ю. М. Матарзин, Б. Б. Богословский, И. К. Мацкевич // Пермь: Изд-во ПТУ. – 1977. – 87 с.
3. Браславский, А. П. Расчет ветровых волн / А. П. Браславский // *Труды ГГИ*. – 1952. – вып. 35(89). – С. 94-158.
4. Браславский, А. П. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов / А. П. Браславский / Л.: Гидрометеиздат. – 1969. – 92 с.
5. Браславский, А. П. Расчет минерализации воды в водохранилищах / А. П. Браславский // *Гидрохимические материалы*. – 1961. – Т.32.
6. Гантмахер, Ф. В. Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. – М.: Наука. – 1967. – 575 с.
7. Матарзин, Ю. М. Вопросы морфометрии и районирования водохранилищ / Ю. М. Матарзин, И. К. Мацкевич // *Вопросы формирования водохранилищ и их морфометрия*. Пермь: Изд-во Перм. ун-та. – 1970. – 92 с.
8. Родионов, И. В. О свойствах оценки Хилла экстремального индекса для выборок с загрязнениями / И. В. Родионов // *Сибирский журнал индустриальной математики*. – 2014. – № 1. – С. 3-6.
9. Пинигин, Д. Д. Оценка качества воды водохранилища Нерюнгринской ГРЭС / Д. Д. Пинигин, Н. А. Николаева, Т. А. Салова, М. И. Ксенофонтowa // *География и природные ресурсы*. – 2011. – № 5. – С. 37-39.
10. Потапская, Н. В. Оценка накопления отходов потребления в прибрежной зоне озера Байкал и дельте реки Селенги / О. А. Тимошкин, Е. П. Зайцева, А. В. Непокрытых, В. В. Мальник // *География и природные ресурсы*. – 2016. – № 1. – С. 62-69.
11. Селиванова, Д. А. Элементный состав почв и донных отложений водотоков восточного макросклона Приполярного Урала / Д. А. Селиванова // *География и*

*природные ресурсы*. – 2016. – № 1. – С. 87-93.

12. Дубовик, Д. Д. Об оценке стойкости русла р. Днепр в системе водохранилищ // Д. Д. Дубовик / *Международная междисциплинарная конференция молодых ученых «Шевченковская весна»: тезисы докладов*. Киев. – 2015. – С. 73.
13. Дубовик, Д. Д. Расчет заиливания каскада Днепровского водохранилища с помощью ГИС технологии (на примере устья р. Орель) / Д. Д. Дубовик // *Актуальные вопросы ядерно-химических технологий: тезисы докладов*. Севастополь. – 2013. – С. 106.

### Bibliography (transliterated)

1. Maturin, Y. M., Matskevich, I. K. Voprosy morfometrii i rayonirovaniya vodokhranilishch [Questions morphometry and zoning of reservoirs]. *Voprosy formirovaniya vodokhranilishch i ikh morfometriya [Questions of formation of reservoirs and morphometry]*, Perm: Publishing house Perm.University, 1970, 92 p.
2. Maturin, Y. M., Bogoslovsky, B. B., Matskevich, I. K. Gidrologicheskie protsessy v vodokhranilishchakh [Hydrological processes in reservoirs]. *Perm: Publishing house of the technical training College*, 1977, 87 p.
3. Braslavsky, A. P. Raschet vetrovykh voln [Calculation of wind waves]. *Proceedings of the state hydrological Institute*, 1952, 35(89), 94-158.
4. Braslavsky, A. P. Ukazaniya po raschetu ispareniiya s poverkhnosti vodoemov [Guidelines for the calculation of evaporation from the surface of bodies of water], *Leningrag: Gidrometeoizdat*, 1969, 92 p.
5. Braslavsky, A. P. Raschet mineralizatsii vody v vodokhranilishchakh [Calculation of mineralization of water in the reservoirs], *Hydrochemical materials*, 1961, 32.
6. Gantmakher, F. Teoriya matrits [Theory of matrices], Moscow: Nauka, 1967, 575 p.
7. Maturin, Y. M., Matskevich, I. K. Voprosy morfometrii i rayonirovaniya vodokhranilishch [Questions morphometry and zoning of reservoirs]. *Voprosy formirovaniya vodokhranilishch i ikh morfometriya [Questions of formation of reservoirs and morphometry]*, Perm: Publishing house Perm. University, 1970, 92 p.
8. Rodionov, I. V. O svoystvakh otsenki Khilla ekstremalnogo indeksa dlya vyborok s zagryazneniyami [Properties of evaluation index for Hill's extreme pollution samples]. *Sibirskiy zhurnal industrial'noy matematiki [Siberian Journal of Industrial Mathematics]*, 2014, 1, 3-6.
9. Pinigin, D., Nikolaev, N., Salova, T., Ksenofontova, M. Otsenka kachestva vody vodokhranilishcha Neryungrinskoy GRES [Evaluation of the water quality of the reservoir Neryungrin GRES]. *Geografiya i prirodnye resursy [Geography and natural resources]*, 2011, 5, 37-39.
10. Timoshkin, O. A., Zaytseva, E. P., Nepokrytykh, A. V., Mal'nik, V. V. Otsenka nakopleniya otkhodov potrebleniya v pribrezhnoy zone ozera Baykal i del'te reki Selengi [Estimation of accumulation of domestic waste in the coastal zone of Lake Baikal and the Selenga River delta] *Geografiya i prirodnye resursy [Geography and natural resources]*, 2016, 1, 62-69.
11. Selivanova, D. Elementnyy sostav pochv i donnykh otlozheniy vodotokov vostochnogo makrosklona Pripolyarnogo Urala [The elemental composition of soils and sediment of watercourses eastern macro-Polar Urals] *Geografiya i prirodnye resursy [Geography and natural resources]*, 2016, 1, 87-93.

12. **Dubovik, D.** Ob otsenke stoykosti rusla r. Dnepr v sisteme vodokhranilishch [An estimate of the channel resistance p. Dnieper reservoir system], *Mezhdunarodnaya mezhdistsiplinarnaya konferentsiya molodykh uchenykh «Shevchenkovskaya vesna»: tezisy dokladov [Interdisciplinary International Conference of Young Scientists "Shevchenko Spring": abstracts]*, Kyiv, 2015, 73 p.
13. **Dubovik, D.** Raschet zailivaniya kaskada Dneprovskogo vodokhranilishcha s pomoshch'yu GIS tekhnologii (na primere ust'ya r. Orel') [Calculation of siltation Dnieper cascade reservoirs using GIS technology (for example, the mouth of the river. Eagle)]. *Aktual'nye voprosy yadernokhimicheskikh tekhnologiy: tezisy dokladov [Topical issues of nuclear and chemical technologies: abstracts]*. Sevastopol, 2013, 106 p.

#### Сведения об авторах (About authors)

*Дубовик Денис Дмитриевич* – аспирант, Институт технической механики и государственное космическое агентство НАН Украины, ул. Ляшко-Попеля 15, г. Днепрпетровск, Украина, 49005, тел.: 0679563038, e-mail: denic3d@gmail.com.

**Dubovik Denis** – post-graduated student. Institute of engineering mechanics and state space Agency of NAS of Ukraine, tel.: 0679563038, e-mail: denic3d@gmail.com.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Дубовик, Д. Д.** Приближенная методика оценки объема заиления водохранилища – прототипа / **Д. Д. Дубовик** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 164-169. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.24.

*Please cite this article as:*

**Dubovik, D.** Approximate method estimate of the volume of reservoir sedimentation – prototype. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 164-169, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.24.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Дубовик, Д. Д.** Наближена методика оцінки обсягу замулення водосховища – прототипу / **Д. Д. Дубовик** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 164-169. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.24.

**АНОТАЦІЯ** Аналіз станів великих водойм важливо для загальної оцінки стану водойм. Використання зональних характеристик, інформаційних технологій, баз даних, дозволяє відобразити реальний стан водойм. У зв'язку з цим при прогнозуванні екологічного стану водосховища по обмеженій групі екологічних показників можна використовувати дані прототипу для досліджуваного або проектного водосховища (аналога), яке знаходиться в геосистемі близькою за характерними показниками до геосистемі аналога.

**Ключові слова:** геосистема, прототип, інфінітезимальне рішення, інтервал стабільності.

*Поступила (received) 15.05.2016*