

УДК 57.042

## ЭВОЛЮЦИОННО ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ОСНОВЫ УСТОЙЧИВОСТИ ЭКОСИСТЕМЫ ИСКУССТВЕННОГО ВОДОЕМА

Е.И. Шаврак, Т.М. Семенцева

Волгодонский инженерно-технический институт  
Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск (Россия)  
Поступила 15.12.2013

На примере геоэкосистемы Цимлянского водохранилища проведена оценка устойчивости климатических, гидрологических и гидрохимических системоформирующих процессов. Идентифицированы инвариантные свойства, в качестве которых рассматривали пространственно-временные закономерности процессов. Количественно охарактеризован ассимиляционный потенциал водной системы.

*Ключевые слова:* геоэкосистема, Цимлянское водохранилище, устойчивость, инварианты, ассимиляционный потенциал.

**Shavrak E.I., Semenceva T.M. Evolution due to basics sustainable ecosystem artificial reservoirs** – On an example geoeosistemy Tsimlyansk reservoir assessed stability climatic, hydrological and hydrochemical processes sistemoformiruyuschih. Identified invariant properties, which are treated as spatio-temporal patterns of processes. Quantitatively characterized by the carrying capacity of the water system.

*Key words:* geoeosistema, Tsimlyanskoe Reservoir, stability, invariants, the carrying capacity.

В условиях неравномерного естественного распределения водных ресурсов важную роль в снабжении населения водой играют искусственные водоемы. Они являются весьма уязвимыми геоэкосистемами, что связано с формированием общего дисбаланса гидросферы при строительстве. К крупнейшим искусственным водоемам России относят Цимлянское водохранилище (ЦВ), расположенное в русле р. Дон и функционирующее с 1952 г. За 60 лет его эксплуатации произошли системные негативные изменения жизнеобеспечивающих ресурсов (Никаноров и др., 2012). Очевидно, что они сопряжены со снижением устойчивости геоэкосистемы к внешнему воздействию. Согласно закону внутрисистемного динамического равновесия, функционирование любого системного элемента будет устойчивым при поддержании генетически обусловленного уровня жизнеспособности всей системы (Федоров, 2004). Таким образом, решение экологических проблем, сформировавшихся за многолетний период эксплуатации водохранилищ и несущих потенциальную угрозу их эколого-экономической эффективности, должно базироваться на восстановлении и

---

*Шаврак Елена Игнатьевна*, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной экологии, [merphi2013@yandex.ru](mailto:merphi2013@yandex.ru); *Семенцева Татьяна Михайловна*, студентка, [Tatyana\\_semenceva@mail.ru](mailto:Tatyana_semenceva@mail.ru)

поддержании эволюционно сформированного запаса экосистемной устойчивости. В связи с этим особую актуальность приобретают научно-методические аспекты его идентификации, рассмотрению которых посвящена данная работа.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 1 представлена характеристика используемой информации. Одним из наиболее значимых факторов, определяющих характеристики водных ресурсов, являются *климатические* условия территории водосбора. В целях выявления устойчивых пространственно-временных взаимосвязей климатических показателей температуры воздуха (ТВ) и количества осадков (КО) анализировались их временные ряды на 8 станциях Гидрометслужбы, расположенных в бассейне р. Дон, а также в радиусе 300 км от ЦВ.

Характеристика *динамики уровня воды* в водохранилище имеет важное значение как для безопасности гидротехнических сооружений, так и для рыбного хозяйства (Мурашов и др., 2009). При выявлении закономерностей формирования уровня режима ЦВ рассматривались средневзвешенные значения среднемесячных и среднесуточных уровней, замеряемые на водомерных постах г. Цимлянск, х. Суворовский, пгт Нижний Чир, х. Рычков, ст-ца Голубинская, ст-ца Трехостровская, г. Калач-на-Дону, с. Ложки, х. Ильмень-Суворовский, х. Кривской, Цимлянский порт в течение 1954-2011 гг.

Гидрохимические процессы определяют *качественные характеристики* водных ресурсов. В их исследовании использовалась официальная информация Цимлянской гидрометобсерватории (сведения о водных балансах ЦВ), ФГУ УВРЦВ (показатели гидрохимического режима ЦВ в 2000-2009 гг.). Была выбрана группа из 20 показателей, отражающих ионный состав, окисляемость воды, режим биогенных веществ и тяжелых металлов в 17 вертикалях ЦВ в основные фазы водного режима.

Исследование закономерностей **климатических** процессов на территории водосбора ЦВ включало: *анализ структур временных рядов* метеопараметров с помощью метода главных компонент; *анализ детерминированности* межгодовых климатических изменений с помощью фрактального анализа Херста; установление силы и значимости межгодовых климатических изменений с помощью *трендового анализа*; оценку степени пространственного сходства климатических режимов различных метеостанций с помощью *показателей системного сходства* (изоморфизма). При этом оценивались взаимосвязи между временными рядами среднегодовых значений метеопараметров пространственно сопряженных (расположенных друг за другом при движении по водотоку) метеостанций бассейна р. Дон. Полученные в результате анализа значения рангового коэффициента корреляции Спирмена  $K_S$  использовали в качестве одного из показателей степени изоморфизма. При значениях  $K_S \leq 0,3$  эта степень оценивалась как незначительная,  $0,3 < K_S \leq 0,7$  – умеренная,  $0,7 < K_S \leq 0,9$  – высокая,  $K_S \geq 0,9$  – очень высокая.

Методологической основой исследования являлись статистические методы анализа и методы оценки экосистемной устойчивости (Берталанфи, 1969; Фе-

доров, 1975; Сочава, 1978; Израэль и др., 1988; Экологическая оценка..., 2005; Пузаченко, 2010; Шварк и др., 2011).

Таблица 1

Характеристика информации, используемой в исследовании

1. Климатические данные (> 80000 показателей)			
Вид временных рядов	Источник	Пространственная принадлежность	Временной диапазон
среднегодовые, среднемесячные, усредненные дневные значения ТВ и КО	архивы Госфонда, <a href="http://www.meteo.ru/tech/aisori">http://www.meteo.ru/tech/aisori</a>	метеостанции Цимлянска, Калача-на-Дону, Тамбова, Воронежа, Ростова, Таганрога, Гиганта, Ремонтного	ТВ: 1912-2008 гг. КО: 1966-2008 гг.
2. Данные о количественных характеристиках водных ресурсов ЦВ (>4000 показателей)			
объем годового стока р.Дон	лит.источники	верхний бьеф ЦВ	1954-01 гг.
данные водного баланса ЦВ	ФГУ «УВРЦВ»	ЦВ	2001-2009 гг.
уровни предполоводной сработки,	лит.источники, информация ДБВУ, ФГУ «УВРЦВ»,	ЦВ	1954-2011 гг.
среднемесячные и среднесуточные уровни, м БС			1954-1972 гг, 2000-2011 гг.
3. Данные о гидрохимическом режиме ЦВ и питающих его источниках (>10000 показателей)			
данные гидрохимического мониторинга малых рек	лит.источники, информация ДБВУ, ФГУ УВРЦВ, результаты собственных исследований	реки :Росошь, Цимла, Чир, Аксай Есауловский, Аксай Курмоярский, Аксенец, Солоная, Лиска, Донская Царица, Мышкова	1954-1972 гг, 2000-2009 гг.
данные гидрохимического мониторинга ЦВ		22 створа ЦВ	2000-2009 гг.

В ходе идентификации инвариантных закономерностей **уровневого режима** исследовали *внутригодовую устойчивость скоростей изменения уровня*. Для этого использовали канонический метод определения относительного коэффициента устойчивости  $U_{отн}$  (Федоров, 1975), показывающего, как степень изменения параметра устойчивости соответствует степени изменения внешнего воздействия.  $U_{отн}$  рассчитывали по формуле:

$$U_{отн} = \frac{|(R_{j+1} - R_j) / R_j|}{|(\Phi_{j+1} - \Phi_j) / \Phi_j|},$$

где  $R_{j+1}$  и  $R_j$  – значения параметра устойчивости, соответственно, в рассматриваемый и предшествующий ему годы,  $\Phi_{j+1}$  и  $\Phi_j$  – значения показателей внешнего воздействия в те же годы. При  $U_{отн}=0$  анализируемое характеристика устойчива. Система проявляет способность переходить из одного состояния в другое, сохраняя внутренние связи. При  $0 < U_{отн} < 1$  – характеристика относительно устойчива, существенное изменение нагрузки приводит к незначительному изменению параметра устойчивости. При  $U_{отн} > 1$  внешнее возмущение вызывает гораздо большее изменение, характеристика неустойчива. В качестве параметров устойчивости уровневого режима  $R^y$  рассматривали скорости изменения среднемесячных уровней, определяемые по формуле:

$$R_j^{iy} = y_j^{i-1} - y_j^i,$$

где  $R_j^{iy}$  - скорость изменения уровня в  $i$ -м месяце  $j$ -го года, м/месяц,  $U_j^i$  и  $U_j^{i-1}$  - среднемесячные уровни воды, соответственно, в  $i$ -м и предшествующем ему месяце, м БС. В качестве характеристики внешнего воздействия  $\Phi^y$  использовали величину годового стока  $p$ . Дон в верхнем створе ЦВ, допуская, что межгодовые изменения стока равномерно отражаются во все месяцы. На втором этапе исследования с помощью регрессионного анализа изучались *межгодовые взаимосвязи среднесуточных средневзвешенных уровней*.

Выявление **инвариантности гидрохимических процессов** проводилось в 3 этапа. Первоначально оценивали *межгодовую устойчивость взаимосвязей* между потоками основных ингредиентов, входящих в состав воды ЦВ. Анализировались корреляции между валовыми показателями суммарного прихода ( $M_1^{\Pi}$ ) ингредиентов (тн в год) в период 2001-2009 гг. В связи с небольшим количеством наблюдений (9 лет) использовали непараметрический метод коэффициента ранговой корреляции Спирмена. По значению коэффициентов корреляции условно оценивали силу связи между показателями:  $r \leq 0,4$  – слабая связь;  $0,4 \leq r \leq 0,7$  – умеренная связь,  $r \geq 0,7$  сильная связь. Далее рассматривались *корреляции между концентрациями отдельных ингредиентов*. На третьем этапе выявлялись *пространственные закономерности формирования гидрохимического режима*.

При определении **ассимиляционного потенциала ЦВ** был сделан ряд допущений, основанных на характеристиках водохранилища. *Первым допущением* является ограничение времени нахождения загрязняющих веществ в ЦВ одним годом. С одной стороны, этот период охватывает весь спектр основных условий, влияющих на уровень техногенного загрязнения поверхностных вод ЦВ и их способность к самоочищению. С другой стороны, среднемноголетний коэффициент водообмена ЦВ близок к единице, т.е. объем воды, ограниченный площадью конкретного участка ЦВ, ежегодно полностью обновляется. Поскольку более 90% притока воды в ЦВ вносит сток  $p$ . Дон, сделано *второе допущение*, что ежегодная нагрузка на каждый участок формировалась объемами водных масс, численно равными годовому стоку  $p$ . Дон. В качестве *третьего допущения* использована гипотеза о фронтальном вытеснении водных масс с одного участка на другой, применяемая в расчетах коэффициентов водообмена (Штефан, 1975). АЕ, рассчитанную на основе совокупности сделанных допущений, назвали *условной АЕ* или  $AE_{\text{усл}}$ . Ее расчет проводился в соответствии с (Израэль и др., 1988; Экологическая оценка..., 2005).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### А. Инвариантность климатических процессов

1. Временные ряды ТВ в *холодный период* (декабрь, январь, март) характеризуются *сложной структурой*, а именно: составом тренда, включающего не менее 16 различных главных компонент (ГК), а также набором значимых ГК, характеризующих шум и периодичку; повышенным уровнем фрактальности (детерминированности) (табл. 2).

## Характеристики временных рядов ТВ для прибрежной территории ЦВ

месяц	количество ГК, описывающее не менее 96% дисперсии, единиц		доля дисперсии, описываемой первой ГК, %		коэффициент Херста	
	Цимлянск	Калач-на-Дону	Цимлянск	Калач-на-Дону	Цимлянск	Калач-на-Дону
Январь	68	73	39	42	0,7	0,71
Февраль	54	59	56	52	0,54	0,52
Март	78	70	12	15	0,8	0,76
Апрель	18	22	84	80	0,75	0,75
Май	1	1	96	96	0,6	0,61
Июнь	1	1	97	98	0,55	0,54
Июль	1	1	98	98	0,65	0,63
Август	1	1	98	98	0,68	0,7
Сентябрь	1	1	96	96	0,46	0,45
Октябрь	39	42	83	89	0,46	0,45
Ноябрь	64	66	36	38	0,78	0,8
Декабрь	76	78	21	23	0,7	0,65

2. Сезонный ход ТВ в течение всего периода существования ЦВ характеризуется статистически значимым межгодовым повышением ТВ в марте (Шаврак, Фесенко, 2011).

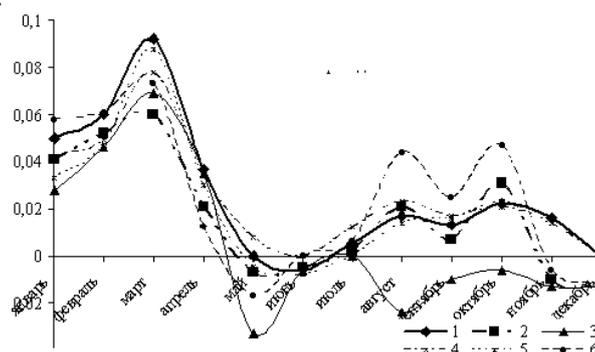


Рис. 1. Углы наклона линейных трендов среднемесячных значений ТВ (период 1952-2008 гг).

1- Цимлянск, 2- Калач, 3- Ростов, 4 – Таганрог, 5- Гигант, 6 – Ремонтное

3. Установлена очень высокая степень сходства сезонного хода ТВ прибрежной части ЦВ с другими участками бассейна р. Дон (рис. 2)

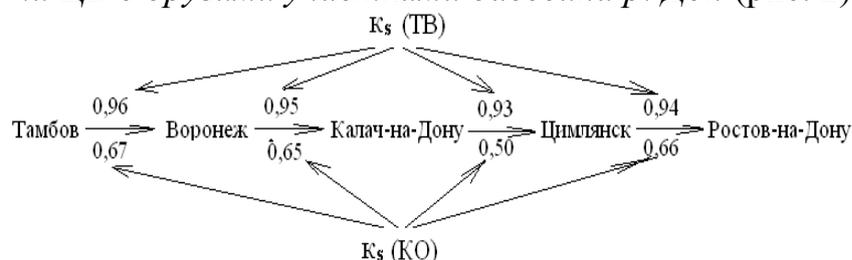


Рис. 2 . Показатели системного сходства временных рядов ТВ и КО (1952-2008 гг.) (по: Шаврак, 2012)

## В. Инвариантность процессов формирования уровенного режима

1. Скорости изменения уровня воды в период с июля по ноябрь отличаются большей стабильностью, чем в остальное время года. *Максимальная устойчивость* к изменению объема притока воды в ЦВ характерна для соответствующих показателей *в июле и сентябре* (Шаврак и др., 2011).

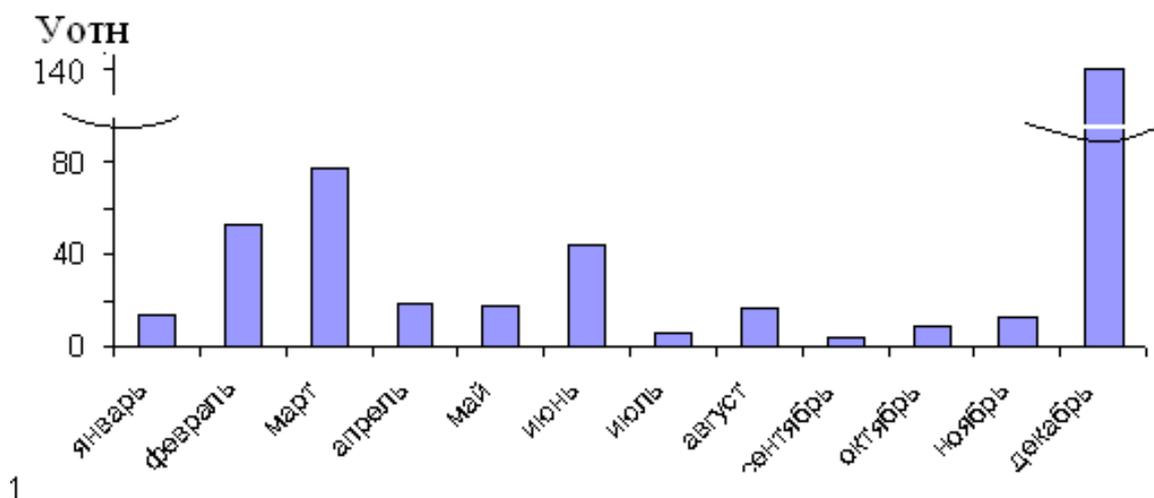


Рис. 3. Среднеголетние относительные показатели устойчивости уровенного режима ЦВ

2. Для периода июль – декабрь установлено практически функциональное *межгодовое сходство хронологических рядов среднесуточных уровней* ( $R^2=0,99$ ), находящее свое отражение в сходстве описывающих эти ряды зависимостей. Они аппроксимируются полиномами третьей степени, характеризуемыми уравнением

$$Y(i) = Y^0 + a i^3 + b i^2 + c i,$$

где  $Y^0$  – среднесуточный уровень воды 1 июня расчетного года, м БС,  $i$  – номер дня в хронологическом ряду периода «июль-декабрь», может принимать значения от 1 до 214,  $Y(i)$  – уровень воды в день с номером  $i$ . Коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$  отражают особенности уровенного режима конкретного года

## С. Инвариантность гидрохимических процессов

1. Исследование *взаимосвязей между валовыми потоками ингредиентов* выявило сильные положительные корреляции между количествами поступающей в ЦВ воды, минеральных, органических веществ и марганца (табл. 3). На основании этого можно сделать предположительный вывод о генетическом сходстве источников поступления вышеупомянутых ингредиентов в поверхностные воды. К наиболее вероятным таким источникам относятся почвы.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции Спирмена между годовыми валовыми характеристиками потоков ингредиентов (по: Шаврак, 2012)

	$M_{\Sigma и}^{\Pi}$	$M_{OB}^{\Pi}$	$M_{N_{мин}}^{\Pi}$	$M_{P_{мин}}^{\Pi}$	$M_{Fe}^{\Pi}$	$M_{Mn}^{\Pi}$	$M_{Cu}^{\Pi}$	$M_{вода}^{\Pi}$
$M_{\Sigma и}^{\Pi}$	1	<b>0,9</b>	0,3	0,6	0,4	0,6	-0,9	<b>0,9</b>
$M_{OB}^{\Pi}$	<b>0,9</b>	1	0,2	0,5	0,2	<b>0,8</b>	-0,8	<b>0,9</b>
$M_{N_{мин}}^{\Pi}$	0,3	0,2	1	0,3	0	0	0,1	0,3
$M_{P_{мин}}^{\Pi}$	0,6	0,5	0,3	1	0,6	0,4	-0,5	0,6
$M_{Fe}^{\Pi}$	0,5	0,2	0	0,6	1	-0,1	-0,6	0,5
$M_{Mn}^{\Pi}$	0,6	<b>0,8</b>	0	0,4	-0,1	1	-0,5	0,6
$M_{Cu}^{\Pi}$	-0,9	-0,8	0,1	-0,5	-0,6	-0,5	1	-0,9

2. В ходе оценки корреляций между концентрациями разных ингредиентов установлено наличие статистически значимых линейных зависимостей только между показателями ионного состава (табл. 4).

Таблица 4

Характеристики взаимосвязей между показателями гидрохимического режима ЦВ

Участок ЦВ	Коэффициент детерминации $R^2$	Уравнения множественной линейной регрессии.
Верхний	0,94	Сух.ост.=61,2+0,85 $HCO_3^-$ 2,2 $SO_4^{2-}$ +1,38СГ
	0,87	Жестк.=0,65+0,047Ca <sup>2+</sup> +0,064Mg <sup>2+</sup>
Центральный	0,84	Сухой ост.=109 +0,89 $HCO_3^-$ +2,28 $SO_4^{2-}$
	0,88	Жестк.=0,50+0,036Ca <sup>2+</sup> +0,087Mg <sup>2+</sup>
Приплотинный	0,74	Сухой ост.=161,7 +0,8 $HCO_3^-$ +1,94 $SO_4^{2-}$
	0,90	Жестк.=0,51+0,035Ca <sup>2+</sup> +0,088Mg <sup>2+</sup>

3. В ходе анализа пространственной изменчивости гидрохимических процессов (2000-2009 гг.) установлено межгодовое сходство пространственной динамики уменьшения среднегодовых концентраций ионов кальция, гидрокарбонатов, сухого остатка и общей жесткости при движении водных масс от верхнего створа ЦВ к нижнему. Пространственные особенности формирования солевого состава описываются статистически значимыми регрессиями высокого качества:

$$C(Ca^{2+}) = 0,1017x^2 + 0,158x + 64 (R^2=0,97)$$

$$C(HCO_3^-) = 0,0927x^2 - 0,2341x + 72 (R^2=0,98)$$

$$C(\text{общая жесткость}) = 1,2458x + 74 (R^2=0,95)$$

$$C(\text{сухой остаток}) = 0,0442x^2 - 0,1897x + 87 (R^2=0,97)$$

В уравнениях регрессий зависимая переменная  $C$  – концентрация компонента, выраженная в долях относительно его содержания в верхнем створе ЦВ, независимая переменная  $x=0,1*l$ , где  $l$  – расстояние от расчетного створа акватории ЦВ до нижнего створа ЦВ, км.

#### Д. Ассимиляционный потенциал ЦВ

В табл. 5 приведены значения показателей  $AE_{\text{усл}}$  участков ЦВ и всего водохранилища в целом.

Таблица 5

#### Характеристики ассимиляционного потенциала ЦВ

№ п/п	Ингредиент	Ассимиляционная емкость				ЦВ тн/год
		отдельных участков ЦВ, тн/км <sup>2</sup> *год				
		Верхний	Чирской	Центральный	Приплотинный	
1	марганец	0,25	1,10	0,24	0,00	767
2	медь	0,24	0,04	0,01	0,00	99
3	железо	6,73	1,81	0,75	0,04	3592
4	ХПК	416,77	444,11	31,67	45,02	376901
5	БПК <sub>5</sub>	53,81	9,74	3,15	16,66	38199
6	нефтепродукты	1,18	0,30	0,66	0,40	1523
7	нитраты	3793,57	1143,12	350,96	477,47	2395671
8	аммоний	12,75	4,97	2,75	5,71	13748
9	фосфаты	3,23	6,37	3,86	7,14	13831
Всего		4288,53	1611,56	394,05	552,44	2844331

Необходимо отметить, что от Верхнего участка ЦВ к Приплотинному отмечается уменьшение способности экосистемы к самоочищению от марганца, меди и нефтепродуктов.

#### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В ходе проведенного исследования установлены эволюционно обусловленные закономерности системоформирующих процессов геоэкосистемы ЦВ, в том числе устойчивое межгодовое повышение ТВ в марте, сходство сезонного хода ТВ прибрежной части ЦВ с другими участками бассейна р. Дон, инвариантность процессов формирования уровня режима во второй половине года, генетическое сходство источников поступления в ЦВ минеральных, органических веществ и марганца, пространственные особенности формирования солевого состава. Количественно охарактеризован ассимиляционный потенциал ЦВ, составляющий почти 3 млн тонн /год по отношению к основным загрязняющим веществам. Выявленные закономерности обусловлены действием комплекса разномасштабных факторов глобального, регионального и локального происхождения. Они поддерживают состояние системы, заключая в себе потенциал устойчивости ее характеристик. Полученные результаты могут быть использованы в системе мониторинга состояния ЦВ для диагностики степени отклонений геоэкосистемы от состояния устойчивости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берталанфи Л.** Общая теория систем. М.: Прогресс, 1969. С. 23-82.
- Израэль Ю.А., Цыбань А.В., Вентцель М.В., Шигаев В.В.** Обобщенная модель ассимиляционной емкости морской экосистемы // ДАН СССР. 1988. Т. 272, № 2. С. 459-462.
- Мурашов А.В., Дубинина В.Г., Александровский А.Ю.** Требования рыбного хозяйства и их учет при разработке правил использования водных ресурсов водохранилищ ГЭС // Гидротехническое строительство. 2009. № 12. С. 28-32.
- Никаноров А.М., Хоружая Т.А., Мартышева Н.А.** Современные характеристики и тенденции многолетних изменений эколого-токсикологического состояния Цимлянского водохранилища // Метеорология и гидрология. 2012. № 4. С. 75-85.
- Пузаченко Ю.Г.** Инварианты динамической геосистемы // Известия РАН. Серия географич. 2010. № 5. С. 6-16.
- Сочава В.Б.** Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 293 с.
- Федоров В.Д.** Концепция устойчивости экологических систем // Всесторонний анализ окружающей природной среды. Тр. советско-американского симпозиума. Тбилиси, 25-29 марта 1974 г. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. С. 207-217. – **Федоров М.М.** Проблемные исследования в системе природопользования. СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2004. 304 с.
- Шаврак Е.И.** Изоморфизм системоформирующих признаков р. Дон // Вода: химия и экология. 2012. № 10. С. 9-16. – **Шаврак Е.И., Татевосова М.Р., Шаврак Д.С.** Вероятностно-детерминированное прогнозирование количественных характеристик водных ресурсов Цимлянского водохранилища // Глобальная ядерная безопасность. 2011. № 1 (3). С. 34-38. – **Шаврак Е.И., Фесенко Л.Н.** Анализ многолетних климатических изменений в прибрежной части Цимлянского водохранилища // Безопасность жизнедеятельности. 2011. № 10. С. 38-43. – **Шаврак Е.И., Фесенко Л.Н., Генераленко И.А.** Химический баланс веществ в водной составляющей Цимлянского водохранилища // Вода: химия и экология. 2012. № 4. С. 3-8. – **Штефан В.М.** К расчету водообмена долинных водохранилищ // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1975. 5. С. 57-64.
- Экологическая оценка** загрязнения западной части Северного Каспия нефтяными углеводородами. Атлас / Отв. ред. С.К. Монахов; Каспийский морской научно-исследовательский центр. Астрахань, 2005. 50 с.