

УДК [574:556](28)[477.41]

**В. М. Тимченко**

**ВОДООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ КАК ФАКТОР  
ФОРМИРОВАНИЯ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ В  
ЭКОСИСТЕМАХ ДНЕПРОВСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ**

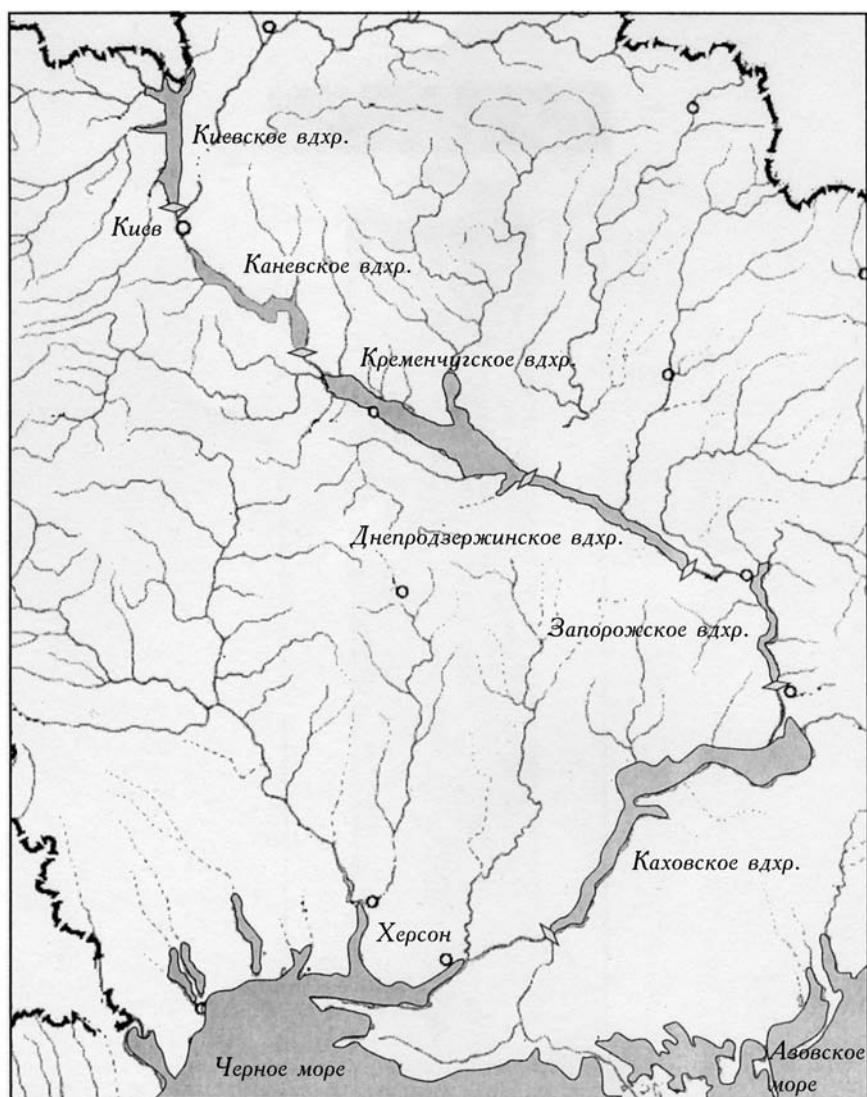
Предложено эколого-гидродинамическое районирование водохранилищ Днепровского каскада, в основе которого лежит учет различий генезиса и показателей динамики водных масс в зонах, занятых и незанятых транзитным стоком. Оценена активность водообмена в транзитных и нетранзитных зонах каждого из шести днепровских водохранилищ. Обосновано положение о том, что определение интенсивности водообменных процессов в эколого-гидродинамических зонах может стать ключом к количественной оценке биотического баланса и потоков энергии в экосистемах каскадных водохранилищ.

**Ключевые слова:** каскадные водохранилища, эколого-гидродинамическое районирование, показатели водообмена.

При любых экологических оценках и прогнозах, связанных с изучением условий формирования качества вод и биопродуктивности водоемов, важнейшим этапом исследования является определение интенсивности их внешнего и внутреннего водообмена. Первый зависит от составляющих водного баланса. Для водохранилищ Днепровского каскада (рис. 1) показатели внешнего водообмена определены для любых условий (средние, наиболее вероятные, при высокой и низкой водности Днепра и др.) [9]. По интенсивности внешнего водообмена все днепровские водохранилища относятся к водоемам транзитно-аккумулятивной группы [11]. Наиболее проточным в каскаде является Днепродзержинское, здесь вода сменяется в среднем за 18 сут. Высоким внешним водообменом характеризуются также Каневское и Запорожское водохранилища (20—23 сут). Остальные менее проточные — в Кременчугском и Каховском вода условно сменяется за 3—4 мес.

Внешний водообмен в значительной степени определяет водообменные процессы внутри любого водохранилища [1, 5]. Чем больше внешний водообмен, тем интенсивней происходит в водоеме перемещение водных масс. Однако на разных участках каждого из водохранилищ эта закономерность может в определенной степени трансформироваться за счет местных гидрологических, морфологических, метеорологических и других условий. Учет этой трансформации принципиально важен, когда речь идет об оценке биотических условий функционирования экосистем водохранилищ в целом или их отдельных участков. Нами уже доказано [15], что состояние экоси-

© Тимченко В. М., 2010



1. Каскад днепровских водохранилищ.

стем речных участков днепровских водохранилищ определяется условиями как в основном русле, так и в так называемой придаточной сети (пойменные озера, рукава, заливы и др.). То же, можно полагать, касается и озеровидных (озерных) участков днепровских водохранилищ, где в качестве придаточной сети выступают зоны, по которым не происходит основной транзит водных масс.

Каждый водный объект суши имеет собственную гидрологическую структуру, то есть пространственные комбинации разнородных водных масс [1, 12]. Анализ этой структуры является предметом специальных исследе-

дований. Определено, например, что пространственная структура водохранилищ более сложная, чем озерная. Особенно это проявляется у водохранилищ долинного класса [13]. Известно, что водохранилища Днепровского каскада ГЭС относятся именно к этому классу и служат объектом многолетних попыток разработки различных схем районирования.

Наиболее распространенной до сих пор является схема акваториального деления, в основе которой лежит использование гидроморфологических показателей. Акватории днепровских водохранилищ, как правило, делятся при этом на три части — верхний, средний и нижний участки [3]. Для учета местных условий (поступление генетически различных водных масс крупных притоков, наличие крупных заливов и т. п.) указанное деление дополняется подучастками.

Районирование акваторий по гидроморфологическим показателям правомерно и успешно применяется в гидрологии водохранилищ. Однако с экологических позиций такой подход не всегда является объективным и информативным. Это касается прежде всего оценки водообменных процессов и гидродинамических условий функционирования отдельных частей экосистем водохранилищ — принципиально важных абиотических факторов. Так, на озерных участках каждого из водохранилищ Днепра есть зоны, где осуществляется основной транзит водных масс между выше и ниже расположенными гидроэлектростанциями. Причем этот транзит локализуется не только в местах затопленного русла, но и захватывает более обширные пространства. Остальная акватория водохранилищ занята водными массами, динамика которых формируется не столько стоковыми, сколько дрейфовыми и компенсационными течениями, а также ветровым волнением, колебанием уровня воды, длинными прямыми и обратными волнами, сейшами и другими внутриводоемными явлениями.

Гидродинамика транзитных и нетранзитных зон озерных участков водохранилищ формирует в них принципиально разные биотопические условия жизни гидробионтов, их популяций и сообществ. Кроме того, транзитные и нетранзитные зоны оказывают взаимное влияние на условия формирования качества вод и биопродуктивности путем обмена между собой водными массами, растворенным и взвешенным веществом и гидробионтами. Поэтому определение интенсивности обменных, в первую очередь водообменных, процессов на границах транзитных и нетранзитных зон может стать ключом к количественной оценке биотических потоков энергии в экосистемах водохранилищ.

**Материал и методика исследований.** Для выделения транзитных и нетранзитных зон в каскадных водохранилищах необходимо иметь обширный банк данных натурных измерений, в частности течений (ведущего гидродинамического процесса). Эти данные, как правило, ограничены и не охватывают весь диапазон гидрометеорологических условий на водоемах. Поэтому выделять указанные зоны по данным натурных наблюдений можно лишь условно. Это касается и всякого рода известных расчетных способов.

Широкие перспективы для оценки внутриводоемного водообмена и гидродинамических условий на озерных участках водохранилищ открываются при использовании методов математического и физического моделирования течений. В экологической гидрологии континентальных водоемов моделирование течений используется довольно успешно [6, 7, 9]. Нами для водоемов Украины, в том числе для днепровских водохранилищ, применяется гидродинамическая модель, в которой использован метод полных потоков, представленный для случая малых глубин [2, 10, 14]. Итогом моделирования являются схемы распределения по акватории водоемов функций токов (расходов воды), а также векторов течений на любых горизонтах или усредненных по вертикали. При этом учитываются практически все факторы генерации течений (приток и отток воды снаружи, направление и скорость ветра, морфология и шероховатость ложа, конфигурация берегов).

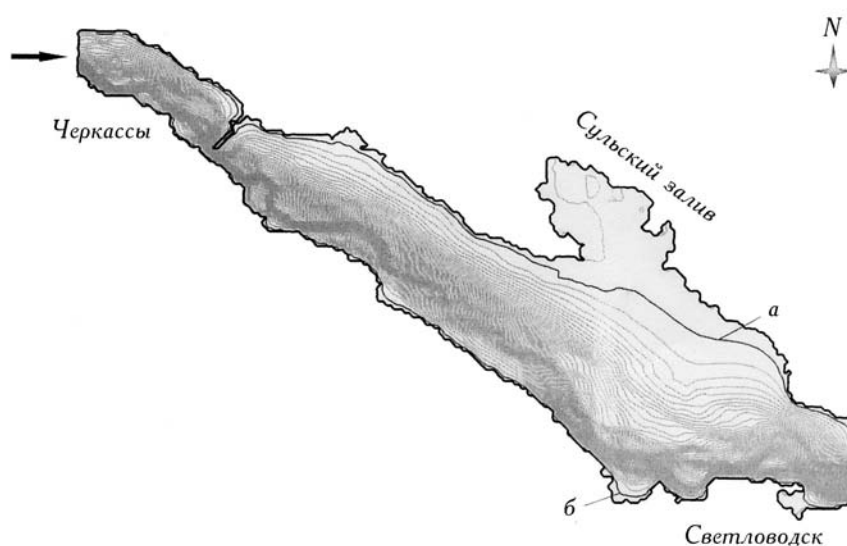
Выделение транзитных и нетранзитных зон на водохранилищах Днепро-вского каскада осуществлено следующим образом. Смоделированы указанным методом схемы распределения функций токов в штилевую погоду. Это ситуации, при которых основным генератором перемещения водных масс в водохранилищах являются попуски ГЭС и поступление воды из притоков. Именно при таких условиях на схемах можно выделить зоны, где транзитный сток крайне незначителен.

При установлении границ между транзитными и нетранзитными зонами принято условие, что через последние может транспортироваться не более 1% стока. Практически, границами зон при этом становятся изолинии функций токов, составляющих 0,5 и 99,5% общего транзитного расхода воды. Этот критерий условный, но его правомерность подтверждается косвенно результатами сопоставления многих гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических показателей водных масс в указанных зонах. В них действительно отмечаются принципиально разные условия формирования качества водной среды и функционирования биотических компонентов экосистем.

На рисунке 2 для иллюстрации технологии определения границ между транзитными и нетранзитными зонами приведена схема течений в Кременчугском водохранилище в штилевую погоду при транзитном стоке  $700 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Нужно отметить, что при изменении транзитных расходов границы между эколого-гидродинамическими зонами практически не смещаются. Контрольные расчеты показывают, что ни на одном из днепровских водохранилищ разность площадей нетранзитных зон при экстремально низких и экстремально высоких расходах не превышает 1—3%, что меньше допустимых погрешностей самих расчетов и наблюдений.

Эколого-гидродинамическое районирование днепровских водохранилищ, осуществленное по вышеизложенным принципам, приведено на рисунках 3—6. Представлены водохранилища с явно выраженными озерными участками. Схемы имеют высокоточную электронную картографическую основу и могут применяться при любого рода экологических оценках, расчетах и прогнозах.



2. Эколого-гидродинамическое районирование озерного участка Кременчугского водохранилища: *a* — левая граница транзитной зоны (линия потоков  $3,5 \text{ м}^3/\text{с}$  —  $0,5\%$  транзитного стока, равного  $700 \text{ м}^3/\text{с}$ ); *b* — правая граница (линия токов  $695,5 \text{ м}^3/\text{с}$  —  $95,5\%$  транзитного стока).

Критерий 1%-ного стока по нетранзитным зонам правомерен и для эколого-гидродинамического районирования речных участков днепровских водохранилищ. К нетранзитным зонам там относится в основном вся придаточная сеть.

Заметим, что параметры речных участков, то есть их длины, устанавливаются вполне определенно. Их нижние границы располагаются там, где затухают внутрисуточные волны попусков выше расположенных ГЭС. Количеством длины речных участков ( $L$ , км) определены по соотношению

$$L = -\ln \frac{A_L}{A_{ГЭС}} (0,032b + 0,0276)^{-1}, \quad (1)$$

которое исходит из уравнения трансформации амплитуды колебания уровня воды на речных участках днепровских водохранилищ, полученного нами ранее [9]. В формуле (1):  $A_L$  и  $A_{ГЭС}$  — амплитуда изменения уровня воды при попусках ГЭС на расстоянии  $L$  и в нижнем бьефе гидроузла, соответственно;  $b$  — ширина водной системы, км. Обычно на нижних границах речных участков амплитуды внутрисуточных волн попусков ГЭС уменьшаются на 80—85%, и приурочены эти границы, как правило, к резким расширениям водной системы, то есть к резким увеличениям ширины  $b$ .

Итоги расчетов длин речных, а также озерных участков днепровских водохранилищ приведены в таблице 1. Там же даны основные морфометрические характеристики эколого-гидродинамических зон речных и озерных участков всех шести днепровских водохранилищ.

**1. Морфометрические характеристики эколого-гидродинамических (транзитных и нетранзитных) зон днепровских водохранилищ**

Водохранилища	Участки	Границы участков, км от верховья водохранилища	Площадь водного зеркала (F), км <sup>2</sup>		Средняя глубина (h), м		Объем (V), км <sup>3</sup>		
			транзитная	нетранзитная	транзитная	нетранзитная	транзитная	нетранзитная	всего
Киевское	В целом	0—110	509	379	5,30	1,70	2,70	0,64	3,34
Каневское	Речной	0—43	30	23	6,20	3,30	0,19	0,08	0,27
	Озерный	43—150	404	147	5,29	2,72	2,14	0,40	2,54
Кременчугское	В целом	0—150	434	170	5,36	2,80	2,33	0,48	2,81
	Речной	0—46	37	88	4,50	2,30	0,17	0,20	0,37
Днепродзержинское	Озерный	46—165	1471	571	6,56	6,08	9,66	3,48	13,14
	В целом	0—165	1508	659	6,51	5,58	9,82	3,68	13,50
Запорожское	Речной	0—35	15	47	5,33	1,40	0,08	0,04	0,12
	Озерный	35—122	128	377	9,16	3,05	1,17	1,15	2,32
Каховское	В целом	0—122	143	424	8,76	2,80	1,25	1,19	2,44
	Речной	0—46	30	93	7,17	0,54	0,22	0,05	0,27
Каскад	Озерный	46—129	116	171	22,28	2,75	2,58	0,47	3,05
	В целом	0—129	146	264	19,10	1,97	2,80	0,52	3,32
Каскад	Речной	0—32	31	95	5,74	2,99	0,18	0,28	0,46
	Озерный	32—213	1729	294	9,18	6,31	15,88	1,86	17,74
Каскад	В целом	0—213	1760	389	9,12	5,50	16,06	2,14	18,20
	Речной	202*	143	346	5,87	1,88	0,84	0,65	1,49
Каскад	Озерный	687*	4357	1939	7,83	413	34,13	8,00	42,13
	В целом	0—889	4500	2285	7,78	3,78	34,97	8,65	43,62

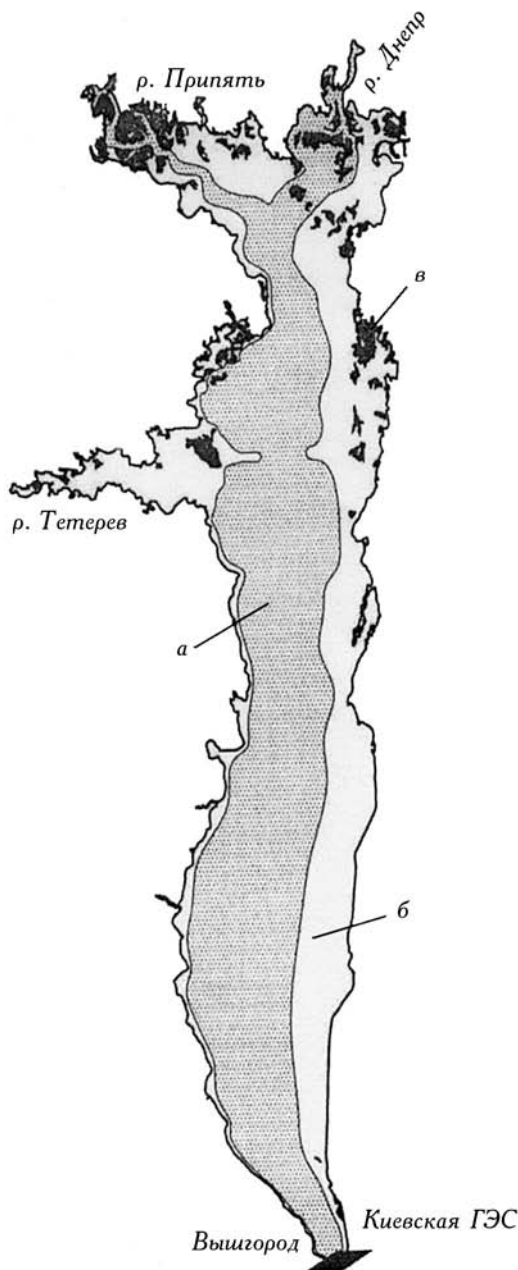
\*Общая длина участков, км.

**Результаты исследований и их обсуждение**

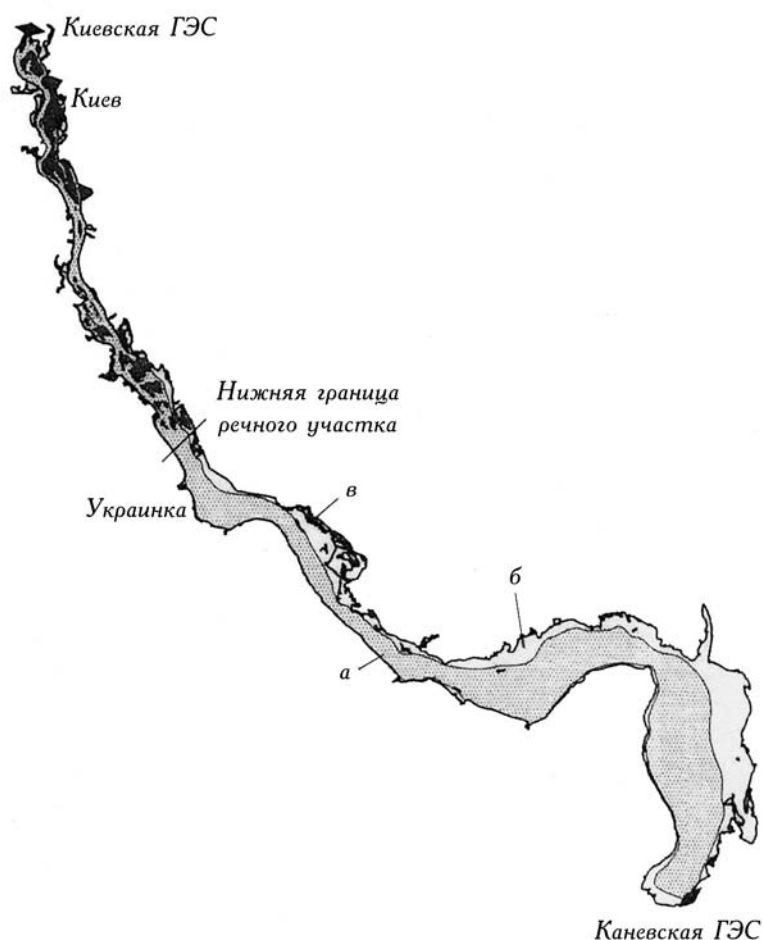
Транзит стока Днепра по каскаду водохранилищ осуществляется по акватории, составляющей 4500 км<sup>2</sup> (см. табл. 1). Нетранзитными являются 2285 км<sup>2</sup> водного пространства, что превышает треть общей площади водного зеркала. В транзитных зонах содержится 34,8 км<sup>3</sup> воды (81% общего объема водохранилищ), в нетранзитных — 8,1 км<sup>3</sup> (19%).

Отмеченное выше наводит на мысль о необходимости уточнения такого экологически значимого гидрологического показателя каскада днепровских водохранилищ, как его проточность. Ранее время добегания водных масс по каскаду при средней водности Днепра оценивалось нами в 354 сут [3, 9]. При высокой водности реки оно могло уменьшиться до 220 сут, при низкой — увеличиться до 583 сут. Если же учесть рассматриваемый нами факт стока реки в основном по транзитным зонам, среднее время добегания по каскаду становится равным 280—285 сут. При высокой водности Днепра водные массы перемещаются по каскаду всего за 175 сут, то есть меньше, чем за полгода. Лишь при очень низкой водности реки днепровская вода, поступающая к водохранилищам, достигает устья реки через год. Приведенные значения могут в определенной степени варьировать, но сам порядок величин представляет собой крайне необходимый информативный показатель важного абиотического фактора функционирования их экосистем — проточности.

Для оценки водообменных процессов в каждом из озерных участков днепровских водохранилищ осуществлено моделирование циркуляций вод при ши-



3. Эколого-гидродинамическое районирование Киевского водохранилища. Здесь и на рис. 4—б: а — транзитная зона; б — нетранзитная зона; в — острова.



4. Эколого-гидродинамическое районирование Каневского водохранилища.

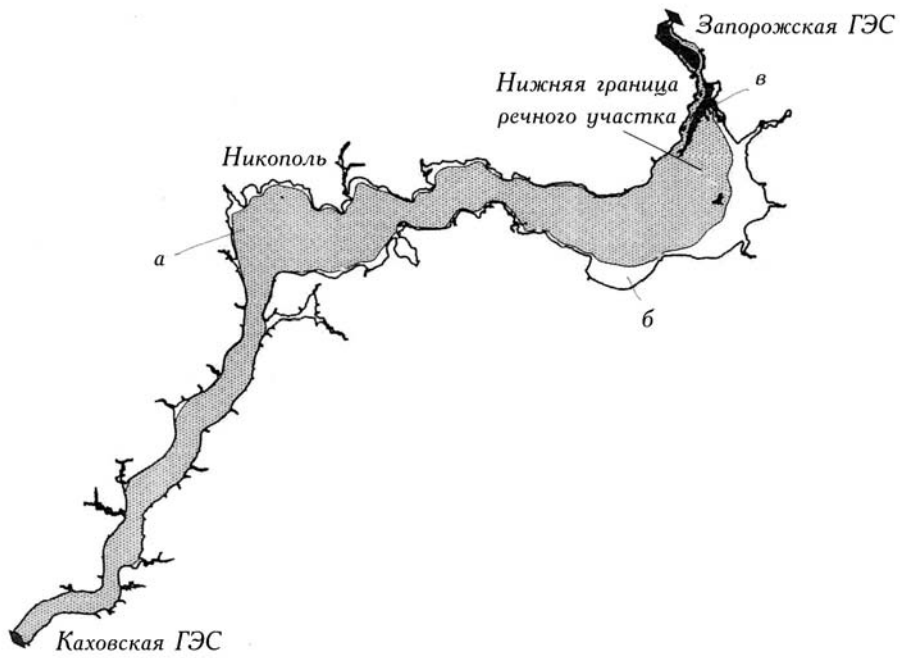
роком диапазоне исходных гидрометеорологических и техногенных условий. Это позволило определить, в частности, интенсивность перетока водных масс через границы установленных нами эколого-гидродинамических зон.

Технология таких определений достаточно проста. Для ее иллюстрации приведен рисунок 7, где на схемы циркуляций вод озерного участка Кременчугского водохранилища при заданных, близких к средним, гидрометеорологических условиях нанесены границы между транзитной и нетранзитной зонами. Переток между зонами происходит в тех местах, где отмечается пересечение границ изолиниями функций токов. Так, например, приток воды из водохранилища к Сульскому заливу при ветре восточного направления (см. рис. 7, а) происходит через восточную его часть, отток — через западную. Генератором такого водообмена является циклональный вихрь мощностью до  $500 \text{ м}^3/\text{с}$ . При усилении ветра восточного направления интенсивность перетока между эколого-гидродинамическими зонами в районе за-

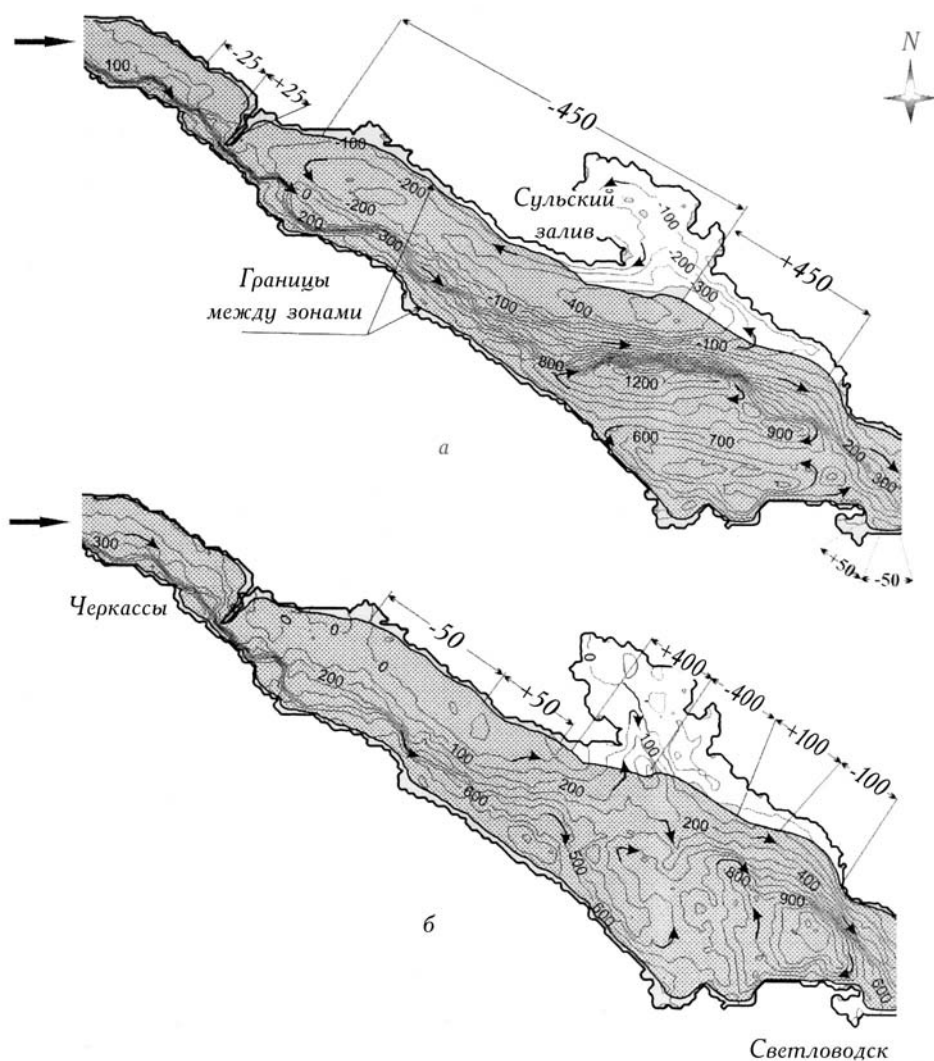




5. Эколого-гидродинамическое районирование Кременчугского водохранилища.



6. Эколого-гидродинамическое районирование Каховского водохранилища.



7. Водообмен между эколого-гидродинамическими зонами Кременчугского водохранилища при восточном (а) и южном (б) ветре 3 м/с. Транзитный расход —  $700 \text{ м}^3/\text{с}$ . Числа по периметру — переток,  $\text{м}^3/\text{с}$  (плюс — приток в нетранзитную зону, минус — отток из нее).

лива, как показывают результаты расчетов, может увеличиваться в несколько раз.

Южный ветер (см. рис 7, б) формирует антициклональную циркуляцию в районе залива, обеспечивающую приток воды интенсивностью до  $400 \text{ м}^3/\text{с}$  через западную его часть. При северном и западном ветрах обмен водными массами между заливом и водохранилищем характеризуется примерно такими же величинами.

## 2. Расходы воды через границы эколого-гидродинамических зон озерных участков днепровских водохранилищ при характерных для летне-осеннего периода водности и скорости ветра

Водохранилища (средние транзитные расходы воды, м <sup>3</sup> /с)	Зоны	Расходы притока (оттока) воды (м <sup>3</sup> /с)					усредненные — с учетом вероятности направлений ветра и штилей (15%)
		при разных направлениях ветра*					
		северном (24%)	восточном (15%)	южном (20%)	западном (26%)		
Киевское (500)	Транзитная	950	750	700	850	701	
	Нетранзитная	450	250	200	350	277	
Каневское (770)	Транзитная	1250	1155	1205	1095	1008	
	Нетранзитная	480	285	435	325	330	
Кременчугское (770)	Транзитная	1500	1295	1320	1495	1207	
	Нетранзитная	730	525	550	725	552	
Каховское (800)	Транзитная	1710	1700	1700	1735	1456	
	Нетранзитная	910	900	900	935	776	

\*Вероятность направлений ветра (по справочнику «Клімат України», 2003); скорость ветра 3 м/с.

Для верификации результатов моделирования использован обширный материал натуральных измерений на водохранилищах, осуществленных специалистами отдела гидрологии Института гидробиологии Национальной академии наук Украины в период с 1970 по 2009 г. Как правило, разность между рассчитанными и измеренными величинами средних по вертикали скоростей течения не превышает 1—3 см/с. Отклонения рассчитанных и наблюдаемых направлений течений в отдельных точках более существенны и в некоторых случаях могут достигать 45—75°. Однако параметры циркуляционных образований и их местоположение моделируются четко и материалами натуральных исследований подтверждаются.

В таблице 2 представлены результаты определения наиболее вероятных расходов притока — оттока через границы эколого-гидродинамических зон озерных участков днепровских водохранилищ в летне-осенний период. В качестве расходов притока — оттока транзитных зон приняты суммы транзитных расходов и перетоков между зонами.

Достоверность приведенных в таблице 2 данных косвенно подтверждается сходством их с результатами определений водообмена между мелководьями и основной акваторией Днепровско-Бугского лимана [8], осуществленных известным расчетным способом [4]. Исследованиями на лимане установлено, что через элементарную (ширина 1 м) площадку вертикальной плоскости раздела между мелководьями и остальной частью лимана протекает за счет ветровых течений около 9,5 м<sup>3</sup>/ч, или 0,0026 м<sup>3</sup>/с воды. На Киевском водохранилище такой элементарный расход составляет примерно 0,00125 м<sup>3</sup>/с, на Каневском — 0,00153, на Кременчугском — 0,0023 и Кахов-

**3. Показатели водообмена эколого-гидродинамических зон озерных участков днепровских водохранилищ в летне-осенний период (июнь — ноябрь) при нормальных гидрометеорологических условиях\***

Водохранилища	Зоны	Объемы зон, км <sup>3</sup>	Объемы притока — оттока за период, км <sup>3</sup>	Коэффициенты водообмена (раз за период)	Периоды водообмена, сут
Киевское	Транзитная	2,70	15,5	5,61	32,1
	Нетранзитная	0,64	4,29	6,70	26,8
Каневское	Транзитная	2,14	20,33	9,50	18,9
	Нетранзитная	0,40	5,12	12,80	14,1
Кременчугское	Транзитная	9,66	23,39	2,42	74,3
	Нетранзитная	3,48	8,58	2,47	73,0
Каховское	Транзитная	15,9	28,60	1,80	100,0
	Нетранзитная	1,86	11,98	6,44	27,9

\*Нормальные расходы транзитного стока в Киевском водохранилище 820 м<sup>3</sup>/с, Каневском — 1150, Кременчугском — 1120, Каховском — 1250 м<sup>3</sup>/с; скорость ветра 3 м/с.

ском — 0,00216 м<sup>3</sup>/с (см. табл. 2). Подчеркнем, что приведенные в таблице 2 данные характеризуют проточность эколого-гидродинамических зон озерных участков днепровских водохранилищ именно в летне-осенний период, когда в них создаются напряженные экологические условия [15].

В конкретные годы показатели перетока через границы зон могут существенно варьировать, что в свою очередь может обуславливать колебания интенсивности потоков энергии и вещества в экосистемах водохранилищ или их отдельных частях.

В таблице 3 приводятся усредненные показатели водообмена в эколого-гидродинамических зонах озерных участков водохранилищ Днепровского каскада в указанный экологически неблагоприятный летне-осенний период. Данные этой таблицы могут уточняться, ибо ориентировочными являются даже исходные для их расчетов показатели водности Днепра на разных участках, скорости ветра, морфометрии водохранилищ и т. д. Однако и в приведенном виде они дают возможность раскрыть принципиально важный аспект гидродинамики изучаемых каскадных водохранилищ — сопоставимость показателей водообмена транзитных и нетранзитных зон. Проточность нетранзитных зон днепровских водохранилищ оказывается даже более интенсивной по сравнению с транзитными, что в определенной степени противоречит бытующему мнению о слабой промываемости мелководий на озерных участках равнинных водохранилищ. Так, с июня по ноябрь в нетранзитной зоне Киевского водохранилища водная масса сменяется в среднем 6,7 раза, тогда как в транзитной зоне вода за этот период обновляется 5,6 раза.

Особо показательным в этом отношении является Каховское водохранилище. Здесь период водообмена транзитной зоны составляет в среднем

100 сут, нетранзитной — менее 28 сут, то есть водные массы здесь обновляются в 3,6 раза быстрее.

Реальные показатели водообмена нетранзитных зон каскадных водохранилищ в летне-осенний период выше, чем приведенные в таблице 3. В процессе водообмена между зонами участвуют еще приток — отток при кратковременных колебаниях уровня воды, формирующиеся при стоковых течениях водоворотные перемещения вод, сгонно-нагонные и сейшевые течения, длинные прямые и обратные волны и т. д. В строгой гидродинамике водоемов учет этих процессов безусловно обязателен. Гидроэкологические же требования к полноте учета всех факторов динамики не столь жестки. Тем не менее, при разного рода гидробиологических оценках и расчетах следует все-таки учитывать, что долевое участие ветровых течений в общем водообмене мелководий на водоемах Украины может составлять 65—85% [9]. Последнее касается средних показателей. При некоторых условиях влияние ветровых течений на водообменные процессы часто оказывается определяющим.

Для аргументации сказанного мы оценили путем математического моделирования скорости течения в эколого-гидродинамических зонах исследуемых водохранилищ при разных скоростях и направлениях ветра. Повышение, например, скорости ветра с 3 до 7 м/с приводит к увеличению скорости течения в нетранзитной зоне Киевского водохранилища с 5,2 до 12 см/с — при северном направлении ветра, при восточном — с 3 до 6,7 см/с, при южном — с 2,9 до 6,6 см/с. В целом, средняя по вертикали и по пространству скорость течения в нетранзитной зоне увеличивается при указанном усилении ветра в 2,4 раза. В среднем по каскаду это увеличение составляет 2,2 раза. В транзитных зонах усиление ветра от 3 до 7 м/с приводит к увеличению средней скорости течения в 1,9 раза. Такое менее эффективное воздействие ветра на скоростной режим транзитных зон объясняется преобладающим участием в нем стоковых течений.

В зимний период водообменные процессы в озерных участках днепровских водохранилищ резко ослабевают. Ледяной покров практически исключает переток воды между эколого-гидродинамическими зонами за счет ветровых (дрейфовых) течений. Основным фактором водообмена становятся колебания уровня воды. На водохранилищах, осуществляющих регулирование стока Днепра (Киевское, Кременчугское и в некоторой степени Каховское), перемещение водных масс через границы зон происходит в основном за счет сезонного понижения уровня воды в водоемах при зимней сработке рабочих емкостей. Определенный вклад в водообмен нетранзитных зон вносят кратковременные и сравнительно небольшие колебания уровня, связанные с внутрисуточным изменением нагрузки выше и ниже расположенных ГЭС. В целом, период водообмена нетранзитных зон днепровских водохранилищ в зимний период увеличивается до 100—480 сут (табл. 4), что в 1,4—34 раза больше летне-осенних показателей. Особенно это касается Киевского и Каневского водохранилищ, где за весь зимний период вода в нетранзитных зонах обновляется всего лишь на 19—30%.

**4. Показатели водообмена эколого-гидродинамических зон озерных участков днепровских водохранилищ в период ледостава\***

Водоохранилища	Продолжительность периода, сут	Зоны	Объемы притока — оттока за период, км <sup>3</sup>	Коэффициенты водообмена (раз за период)	Периоды водообмена, сут
Киевское	110	Транзитная	6,65	2,46	44,7
		Нетранзитная	0,19—0,38**	0,30—0,59	370—185
Каневское	90	Транзитная	5,44	2,54	35,4
		Нетранзитная	0,074**	0,19	486
Кременчугское	100	Транзитная	6,05	0,63	159
		Нетранзитная	2,3—3,4**	0,66—0,98	102—151
Каховское	70	Транзитная	4,23	0,27	263
		Нетранзитная	0,88—1,2**	0,47—0,65	108—148

\*Расходы транзитного стока во всех водохранилищах условно приняты равными 700 м<sup>3</sup>/с.

\*\* Учтена проектная сработка рабочей емкости; реально она существенно меньше, так как рабочая емкость водохранилища по назначению практически не используется.

Наиболее благоприятные водообменные условия для экосистем водохранилищ создаются в периоды весеннего половодья. В это время к рассмотренным факторам внутриводоемного водообмена добавляется приток водных масс к нетранзитным зонам, обусловленный заполнением рабочих емкостей. Наряду с повышенным транзитным стоком этот приток обуславливает в весенний период значительное обновление водных масс в нетранзитных зонах.

**Заключение**

Математическое моделирование циркуляции вод в крупных равнинных водохранилищах Днепровского каскада ГЭС, результаты которого верифицированы большим объемом натурных исследований течений, раскрывает широкие возможности оценки водообменных процессов как важнейшего абиотического фактора функционирования экосистем этих водоемов.

Именно моделирование позволяет наиболее достоверно выделять в таких водохранилищах зоны, где осуществляется транзитный сток (транзитные зоны), и зоны, где водообменные процессы определяются в основном ветровыми течениями и колебаниями уровня воды (нетранзитные).

Результаты расчетов показывают, что интенсивность водообменных процессов в транзитных и нетранзитных зонах днепровских водохранилищ сопоставима.

Более того, показатели водообмена нетранзитных зон в летне-осенний период зачастую оказываются выше, что существенно образом меняет представление о слабой промываемости мелководий на озерных участках равнинных водохранилищ.

Методические подходы к эколого-гидродинамическому районированию днепровских водохранилищ применимы для иных крупных каскадных водохранилищ, что расширяет возможности количественной оценки биотических и энергетических потоков в их экосистемах.

\*\*

*Запропоновано еколого-гідродинамічне районування водосховищ Дніпровського каскаду, в основі якого лежить врахування різниці генезису і показників динаміки водних мас в зонах, зайнятих і незайнятих транзитним стоком. Оцінено активність водообміну в транзитних і нетранзитних зонах кожного із шести дніпровських водосховищ. Обґрунтовано положення про те, що визначення інтенсивності водообмінних процесів в еколого-гідродинамічних зонах може стати ключем до кількісної оцінки біотичного балансу та потоків енергії в екосистемах каскадних водосховищ.*

\*\*

*The ecological and hydrodynamic regionalization of the Dnieper cascade reservoirs has been offered. According to the regionalization, every reservoir is divided on two zones: major and non-major run-off. It bases on taking difference of genesis and dynamic parameters of water masses between these zones into consideration. The water exchange of every zone in the Dnieper reservoirs has been estimated. It is supposed that the intensity evaluation of the water exchange processes can become the key to a quantitative estimation biotic balance and energy flows in reservoirs' ecosystems.*

\*\*

1. Буторин Н.В. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада. — Л.: Наука, 1969. — 322 с.
2. Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В. Основные океанологические задачи теории мелкой воды. — Л.: Гидрометеиздат, 1968. — 299 с.
3. Денисова А.И., Тимченко В.М., Нахшина Е.П. и др. Гидрология и гидрохимия Днепра и его водохранилищ. — Киев: Наук. думка, 1989. — 216 с.
4. Караушев А.В. Речная гидравлика. — Л.: Гидрометеиздат, 1969. — 416 с.
5. Литвинов А.С. Энерго- и массообмен в водохранилищах Волжского каскада. — Ярославль: Изд-во Ярослав. тех. ун-та, 2000. — 83 с.
6. Погдубный С.А., Балонов И.М., Краснопер Е.В. О влиянии горизонтальной циркуляции вод на распределение фитопланктона в оз. Плесеево // Вод. ресурсы. — 1987. — № 2. — С. 119—123.
7. Погдубный С.А., Корнева Л.Г., Минеева Н.М. Влияние горизонтальной циркуляции вод на распределение фитопланктона в Рыбинском водохранилище // Там же. — 1990. — № 2. — С. 148—153.
8. Тимченко В.М. Эколого-гидрологические исследования водоемов Северо-Западного Причерноморья. — Киев: Наук. думка, 1990. — 240 с.
9. Тимченко В.М. Экологическая гидрология днепровских водохранилищ // Гидробиол. журн. — 2006. — Т. 42, № 3. — С. 81—96.

10. Фельзенбаум А.И. Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — 122 с.
11. Фортунатов М.А. О проточности и водообмене водохранилищ // Факторы формирования водных масс и районирование внутренних водоемов. — Л.: Наука, 1974. — С. 111—120.
12. Эгельштейн К.К. Генетическая структура речного стока и её преобразование водохранилищами // Географические направления в гидрологии. — М.: ИГ РАН, РГО МЦ, 1995. — С. 68—85.
13. Эгельштейн К. К. Структурная гидрология суши. — М.: ГЭОС, 2005. — 316 с.
14. Lin Shino-Kung, Leedertse I.I. Multidimensional numerical modeling of estuaries and coastal seas // Adv. Hydrosoci. — 1978. — Vol. 11. — P. 76—88.
15. Timchenko V., Oksiyuk O. Ecosystem condition and water quality control at impounded sections of rivers by the regulated hydrological regime // Ecohydrology and Hydrobiology. — 2002. — Vol. 2 (1—4). — P. 259—264.

Институт гидробиологии НАН Украины, Киев

Поступила 30.04.10