

УДК 556.555.6

В. В. Законнов¹, В. М. Тимченко², А. В. Законнова¹

ИЛОНАКОПЛЕНИЕ В КРУПНЫХ РАВНИННЫХ ВОДОХРАНИЛИЩАХ

На основании материалов многолетних (1931—2015 гг.) исследований на водохранилищах Волги, Днепра, Дона, Камы и Оби проанализированы особенности и закономерности формирования, накопления и распределения донных отложений различных типов в крупных равнинных водохранилищах. Несмотря на схожесть условий образования, исследованные водоемы различаются по морфологическим, гидрологическим и гидродинамическим показателям, а также по режиму эксплуатации. Это накладывает отпечаток на процесс формирования в каждом из них комплекса отложений, которые являются одним из ключевых экологически значимых абиотических факторов функционирования водных экосистем. Определены статистически обоснованные современные и прогнозные показатели пространственно-временного распределения илов в крупных равнинных водохранилищах.

Ключевые слова: крупные равнинные водохранилища, донные отложения, темпы илонакопления, прогноз.

Появление крупных водохранилищ многоцелевого назначения, обусловило необходимость изучения процесса накопления в них донных отложений. Вначале этот процесс рассматривался как потенциально негативный, препятствующий нормальной эксплуатации водохранилищ. Первые же результаты его изучения, показали, что накопление отложений является эксплуатационной помехой лишь в небольших водохранилищах на горных реках [18]. В крупных водохранилищах на равнинных реках негативные последствия накопления донных отложений отмечались лишь на отдельных участках (заливы, порты, навигационные каналы). Попытки количественной оценки масштабов заиления расчетными методами, как показали исследования [3, 6, 14], не всегда были успешными, поэтому наиболее достоверным способом оценки интенсивности илонакопления является определение параметров этого процесса путем наблюдений и измерений в натурных условиях.

Во второй половине XX — начале XXI веков стал активно развиваться, получая все более широкое признание, экологический аспект изучения донных отложений. Он основан на том неопровержимом факте, что донные грунты (отложения) являются важным абиотическим компонентом экосистем континентальных водоемов. Через комплекс гидродинамических, геохимических и гидробиологических процессов илы активно участвуют в об-

© В. В. Законнов, В. М. Тимченко, А. В. Законнова, 2018

мене веществом и энергией с водными массами. Это определяет актуальность изучения закономерностей формирования, распределения и накопления различных типов донных отложений в водохранилищах.

Иловые отложения представляют собой конгломерат из мелких минеральных и органических частиц природного и антропогенного происхождения. Они обладают повышенной сорбционной способностью и активно взаимодействуют с водными массами. Это взаимодействие основывается прежде всего на деструкции органического вещества, обеспечивающей миграцию биогенных элементов в системе «дно — водные массы». Образование и разрушение органо-минеральных комплексов обуславливают процессы сорбции — десорбции в этой системе, куда могут включаться не только биогенные, но и ряд других элементов, в том числе загрязнители.

Илонакопление — часть процесса осадконакопления, касающаяся главным образом мелких частиц независимо от их происхождения. Этот процесс отличается от процессов «занесения» и «заиления», так как более показателен в экологическом аспекте.

Цель статьи — обобщить имеющиеся материалы, оценить специфику формирования, распределения и накопления илистых отложений в крупных равнинных водохранилищах, а также выявить закономерности этих процессов с целью их прогнозирования.

Материал и методика исследований. Формирование грунтового комплекса изучали в природных условиях на водохранилищах Волжского и Днепровского каскадов [3, 4—7, 10, 11, 14, 16, 17], на Каме [13], Нижнем Доне [12] и в реках Сибири [2, 19]. Материалы этих исследований использованы для выяснения закономерностей формирования донных отложений в крупных равнинных водохранилищах. Основные морфометрические и гидрологические показатели этих водохранилищ приведены в таблице 1. Все они, кроме Ивановского и Угличского, относятся к типу пойменно-долинных [1, 20].

Наиболее полный объем информации о результатах илонакопления получен на водохранилищах Волги. Здесь осуществляется многолетний мониторинг. Грунтовые съемки проводятся через каждые 10—20 лет (всего более 15 тыс. станций отбора проб). Работы проводятся по единым общепринятым методикам [3]. Ошибки определения интенсивности илонакопления не превышают 10—20%. Площади накопления илов рассчитывались с использованием батиметрических карт водохранилищ.

Мониторинговые работы показали относительную идентичность процессов осадкообразования в системе водохранилищ Волжского каскада.

Подобная закономерность отмечалась и на днепровских водохранилищах, где наиболее обширные и детальные исследования донных грунтов осуществлялись в 1970-90-х годах [5, 11, 14]. В последние десятилетия эти исследования здесь проводятся эпизодически [16, 17].

1. Основные характеристики исследованных водохранилищ

Водохранилища	Годы создания	Объем, км ³	Площадь, км ²	Длина, км	Средняя глубина, м	Коэффициент водообмена-год ⁻¹
Иваньковское	1937	1,1	327	120	3,4	7,9
Угличское	1940	1,2	249	145	5,0	9,8
Рыбинское	1941	25,4	4550	112	5,6	1,4
Горьковское	1955	8,8	1590	430	5,5	6,0
Чебоксарское	1981	5,2	1200	340	4,3	19,8
Куйбышевское	1955	57,3	5900	510	9,7	5,2
Саратовское	1967	12,9	1831	336	7,0	19,1
Волгоградское	1958	31,4	3117	524	10,1	8,0
Киевское	1964	3,7	922	110	4,0	10,1
Каневское	1972	2,6	581	123	3,9	18,2
Кременчугское	1959	13,5	2250	149	6,0	4,3
Днепродзержинское	1963	2,5	567	114	4,3	20,2
Запорожское	1932	3,3	410	129	8,0	15,8
Каховское	1955	18,2	2150	230	8,5	2,8
Цимлянское	1952	23,9	2702	180	8,8	1,2
Камское	1954	12,2	1915	300	6,5	4,6
Воткинское	1962	9,4	1120	365	8,4	6,0
Новосибирское	1959	8,8	1070	185	8,2	6,6

Результаты исследований и их обсуждение

Осадконакопление — это процесс осаждения на дно взвешенных наносов и тонкодисперсных минерально-органических соединений. Оно происходит одновременно с формированием трансформированных грунтов, образовавшихся в результате размыва дна и берегов, пептизации, подтопления и заболачивания. По результатам натурных исследований на водохранилищах Волги оценены закономерности формирования основных типов грунтов и донных отложений именно этих водохранилищах. Они вкратце сводятся к следующему:

— со времени создания водохранилищ происходит сокращение площадей дна с обнаженными (размытыми) и разбухшими почвами (от 99 до 15%) и переход их в категорию трансформированных грунтов;

— увеличиваются площади дна, занятые песчаными отложениями;

— расширяются площади илов. После 30—40 лет существования водохранилищ происходит постепенная их стабилизация.

Эти же закономерности отмечаются и на днепровских водохранилищах [16, 17].

Структура грунтового комплекса в водохранилищах не одинакова. Интенсивность осадконакопления в отдельно взятом водохранилище зависит от многих факторов, которые в итоге приводят к разному соотношению площадей крупнозернистых наносов и площадей тонкодисперсных отложений (α). Это соотношение может служить показателем структуры донных грунтов конкретного водохранилища.

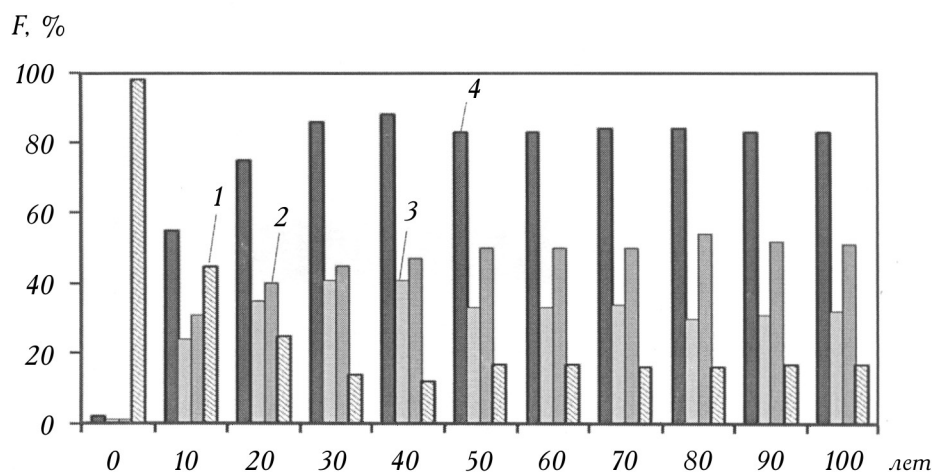
Волжские водохранилища на этом основании можно разделить на три группы. К первой ($\alpha = 0,5—1,5$) относятся Ивановское, Горьковское, Куйбышевское и Волгоградское. Представителями второй группы ($\alpha = 1,5—2,5$) можно считать Угличское, Рыбинское и Чебоксарское. К третьей группе ($\alpha \geq 2,5$) относится Саратовское водохранилище. Водохранилища Днепровского каскада по состоянию на конец 1970-х гг. относились к первой группе ($\alpha = 0,2—1,5$) [4, 14]. Позже показатель структуры донных грунтов этих водоемов несколько увеличился. Так, в Киевском водохранилище по итогам натурных съемок в 2010—2011 гг. этот показатель составил 2,1 (вторая группа).

Деление на группы условное. Тем не менее, в крупных равнинных водохранилищах грунтовой комплекс стремится к установлению определенных соотношений ареалов основных типов осадков. Очевидно, что при существующих гидрометеорологических условиях, геологическом, геоморфологическом строении ложа и эксплуатационном режиме эти пропорции соответствуют оптимальной структуре донных отложений в конкретном водохранилище.

В таблице 2 помимо значений указанного показателя структуры донных отложений (α) каждого из исследуемых водохранилищ, приводятся сведения о параметрах накопления в них крупнозернистых наносов и тонкодисперсных отложений.

Средняя мощность слоя песчаных наносов для длительно эксплуатируемых водохранилищ Волги выравнивается по каскаду и составляет 60—90 мм. В Чебоксарском (29 лет) она минимальна — 30 мм. Мощность илистых отложений неравномерна (72—354 мм).

Для всех водохранилищ Волги характерно увеличение темпов седиментации по длине их акваторий — от зон выклинивания подпора к плотинам. Темпы седиментации увеличены также на более глубоких участках. Однако максимум отложений (> 50%) на водохранилищах Волги отмечается в литорали, так как основное поступление осадкообразующего материала происходит за счет абразионно-эрозионных процессов [9]. На мелководьях накапливается 45—60% поступающего в водоем крупнозернистого осадочного ма-



1. Распределение площадей основных типов донных отложений водохранилищ Волги: 1 — трансформированные грунты; 2 — крупнозернистые наносы; 3 — тонкодисперсные отложения; 4 — вторичные осадки.

териала, что согласуется с результатами исследований переработки берегов [19].

В первые годы существования водохранилищ, когда абразия берегов приводила к лавинной седиментации, дно мелководий было песчаным. Со временем набор грунтов в литорали стал разнообразным — от преимущественно песков и размытых почв в открытых мелководьях до илов (глинистых, торфянистых) и отложений из отмерших водных растений и раковин моллюсков — в защищенных от ветрового воздействия заливах и заостровных пространствах.

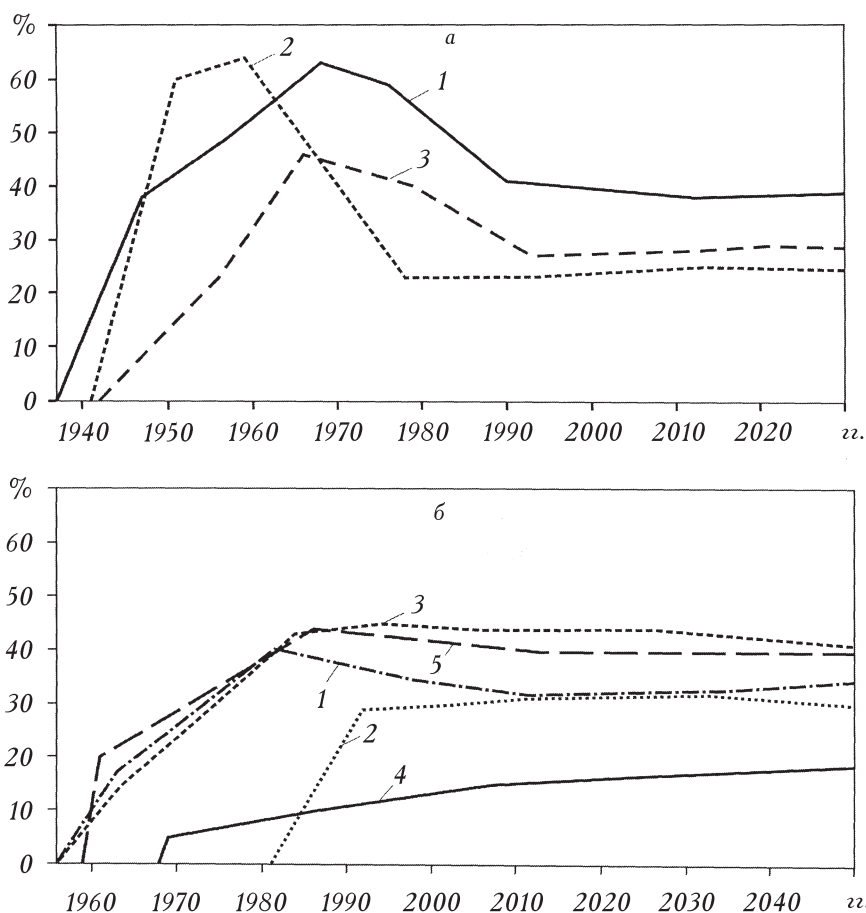
Таким образом, в зависимости от соотношения открытых и закрытых мелководий, в одних водохранилищах Волги произошло сокращение площадей песка, а в других — их увеличение. Этим и объясняются флуктуации площадей крупнозернистых и тонкодисперсных вторичных отложений. Кроме того, пески стали проникать на большие глубины и насыщать скелет глинистых илов крупнозернистыми частицами, переводя их в категорию промежуточных (переходных) отложений — илистых песков и песчаных илов. То же отмечалось при натурных исследованиях на Киевском водохранилище [16, 17].

Процесс седиментации взвешенного материала в водохранилищах в значительной степени определяется гидродинамическим режимом. Его особенностью является сочетание обычных для озер и морей ветровых течений и волнения с постоянным транзитным перемещением водных масс (проточностью). Для большинства водохранилищ исследуемого типа свойственно активное воздействие ветровых волн на дно в пределах значительной части акватории. Оно ослабевает лишь на глубоких участках. Под действием волн

2. Донные отложения, их структура и показатели илонакопления в водохранилищах Волги [6, 8] и Днепра [17]

Типы осадков	Площадь отложений, км ²	Средняя мощность отложений, мм	Объем отложений, млн. м ³	Среднегодовое накопление	
				мм	тыс. т
Иваньковское (53 года), $\alpha = 1,2$					
Крупнозернистые	157,0	86	8,9	1,1	281
Тонкодисперсные	132,7	177	23,5	3,3	238
Угличское (51 год), $\alpha = 2,3$					
Крупнозернистые	135	59	8,0	1,2	249
Тонкодисперсные	57,5	286	16,5	5,6	110
Рыбинское (51 год), $\alpha = 2,2$					
Крупнозернистые	2445	62	150,8	1,2	4186
Тонкодисперсные	1105	340	375,6	6,7	2214
Горьковское (44 года), $\alpha = 1,3$					
Крупнозернистые	708	66	46,8	1,5	1371
Тонкодисперсные	540	199	107,4	4,5	1252
Чебоксарское (29 лет), $\alpha = 1,7$					
Крупнозернистые	630	32	20,4	1,1	1276
Тонкодисперсные	362	88	31,8	3,0	690
Куйбышевское (47 лет), $\alpha = 0,9$					
Крупнозернистые	2458	78	192,3	1,7	4612
Тонкодисперсные	2635	330	868,3	7,0	10026
Саратовское (39 лет), $\alpha = 3,8$					
Крупнозернистые	1038	90	93,4	2,3	3956
Тонкодисперсные	275	354	97,4	9,1	1654
Волгоградское (27 лет), $\alpha = 1,0$					
Крупнозернистые	1320	67	91,0	2,5	5326
Тонкодисперсные	1384	217	300,7	8,0	7324
Киевское (52 года), $\alpha = 2,1$					
Крупнозернистые	238	—	—	—	—
Тонкодисперсные	676	131	65,0	1,4	697

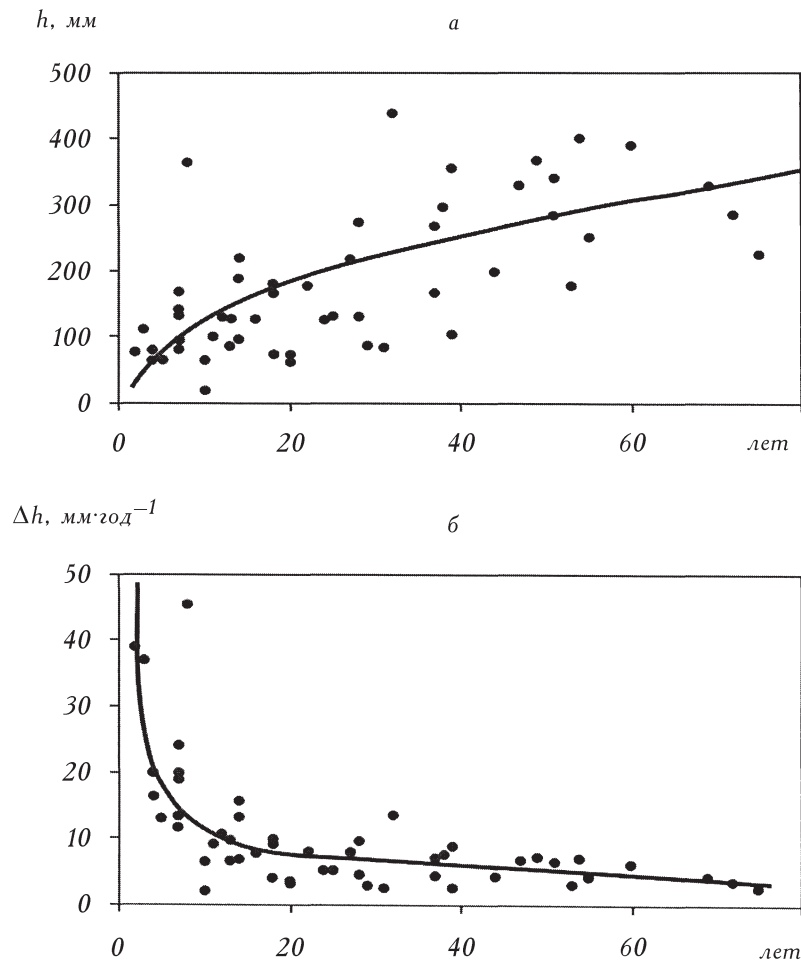
частицы уже отложенного на дно материала неоднократно подвергаются последующему взмучиванию и переносу — трансседиментации. Местоположение зон трансседиментации, их конфигурация и размеры зависят от гидролого-морфометрических условий [15]. Это обуславливает своеобразие



2. Площади иловых отложений (в % от площади дна) в водохранилищах Волги: *a* — Ивановском (1), Угличском (2) и Рыбинском (3); *б* — Горьковском (1), Чебоксарском (2), Куйбышевском (3), Саратовском (4) и Волгоградском (5). Данные после 2012 г. — прогнозные.

процесса илонакопления в каждом из крупных равнинных водохранилищ и одновременно позволяет предположить наличие определенных закономерностей, общих для водоемов данного типа [3,6, 14].

Так, в водохранилищах Волги наблюдаемое при многократных съемках распределение тонкодисперсных отложений свидетельствуют о том, что интенсивная стадия формирования илов в них длилась примерно 10—30 лет (рис. 2). Эта закономерность прослеживается не только в каждом водоеме, но и во всех выделенных в них крупных (объемом более 1 км³) орографических зонах [8]. На водохранилищах Верхней Волги (см. рис. 2, *a*) резкое увеличение площадей иловых отложений сменилось снижением площадей заиления, которое происходило в течение примерно двух-трех десятилетий. Интенсивность этого снижения оказалась соизмеримой с темпами роста площадей илонакопления в начальный период их формирования. Подобной



3. Изменение во времени средней мощности илов (а) и интенсивности илонакопления (б) в исследованных крупных равнинных водохранилищах.

закономерности не наблюдается на остальных волжских (см. рис. 2, б) и днепровских [16, 17] водохранилищах. Обычно после достижения максимальных показателей доля площадей иловых отложений в них остается неизменной или снижается плавно и незначительно. Исключением является русловое Саратовское водохранилище, в котором наблюдается постепенное увеличение ареала илов за счет освоения литоральной зоны в заостровных пространствах.

Мониторинговые материалы по осадконакоплению в водохранилищах Волжского каскада, включающие определения толщины кернов, позволили оценить параметры изменения во времени мощности донных отложений и интенсивности процесса илонакопления в этих водохранилищах (рис. 3).

Описанные закономерности учтены при прогнозировании (экстраполяции) процесса илонакопления в крупных каскадных равнинных водохранилищах. Сравнение рассчитанных площадей накопления илов в зонах их аккумуляции с фактически измеренными на момент последних грунтовых съемок показало высокую степень корреляции.

Заключение

Процессы осадкообразования в крупных равнинных водохранилищах находятся под влиянием многих природных и антропогенных факторов. Разнообразие гидродинамических и морфометрических характеристик водохранилищ приводит к сложной системе накопления и распределения различных типов донных осадков. В то же время существуют общие закономерности, характерные для водохранилищ изучаемого типа. Так, ареалы илов здесь формируются в основном в первые 10—30 лет и мало подвержены изменениям в пространственном аспекте. Увеличение сроков эксплуатации приводит к ослаблению темпов седиментации.

При существующих морфометрических и гидродинамических характеристиках водохранилищ и неизменных режимах их эксплуатации резких изменений площадей илов не происходит и в будущем не ожидается. Можно полагать, что полное заиление крупных водохранилищ на равнинных реках возможно лишь за пределами нескольких столетий. Результаты работы используются и могут быть использованы в будущем при решении фундаментальных и прикладных гидроэкологических задач.

**

На підставі матеріалів багаторічних (1931—2015 рр.) досліджень на водосховищах Волги, Дніпра, Дону, Камі та Обі проаналізовано особливості та закономірності формування, накопичення та розподілу донних відкладів різних типів у великих рівнинних водосховищах. Незважаючи на схожість умов створення, досліджувані водойми різняться за морфологічними, гідрологічними та гідродинамічними показниками, а також за режимом експлуатації. Це накладає відбиток на процес формування в кожному з них комплексу відкладів, які є одним з ключових екологічно значущих абіотичних чинників функціонування водних екосистем. Визначено статистично обґрунтовані сучасні і прогнозовані показники просторово-часового розподілу мулів у великих рівнинних водосховищах.

**

Based on the materials of long-term (1931—2015) studies at the reservoirs of the Volga, Dnieper, Kama and Ob rivers, the features and patterns of formation, accumulation and distribution of various types of bottom sediments in large plain reservoirs have been analyzed. Despite the similarity of the conditions of education, the studied reservoirs differ in morphological, hydrological and hydrodynamic parameters, as well as in the mode of their operation. This definitely affects the formation of a complex of sediments in each of them, which is one of the key ecologically significant abiotic factors in the functioning of aquatic ecosystems. Statistically grounded modern and forecasted indices of spatio-temporal distribution of silt in large plain reservoirs are determined.

**

1. *Авакян А.Б., Широков В.М.* Комплексное использование и охрана водных ресурсов. — Минск: Изд-во Университетское, 1990. — 249 с.
2. *Бейром С.Г., Вострякова Н.В., Широков В.М.* Изменение природных условий в средней Оби после создания Новосибирской ГЭС. — Новосибирск: Наука, 1973. — 143 с.
3. *Буторин Н.В., Зиминова Н.А., Кургин В.П.* Донные отложения верхне-волжских водохранилищ. — Л.: Наука, 1975. — 160 с.
4. *Денисова Л.И., Тимченко В.М., Нахшина Е.П. и др.* Гидрология и гидрохимия Днепра и его водохранилищ. — Киев: Наук. думка, 1989. — 216 с.
5. *Дрозд Н.И.* Заиление водохранилищ // Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР: Каскад днепровских водохранилищ. — Л.: Гидрометеоиздат, 1976. — С. 247—249.
6. *Законнов В.В.* Осадкообразование в водохранилищах Волжского каскада: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. — М., 2007. — 39 с.
7. *Законнов В.В.* Донные отложения Волжских водохранилищ (результаты мониторинга): Материалы науч. конф. (с междунар. участием) «Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод». — Ростов-н/Д., 2015. — С. 227—231.
8. *Законнов В.В.* Илонакопление в системе водохранилищ Волжского каскада // Гидролого-гидрохимические исследования водоемов бассейна Волги. Тр. ИБВВ РАН. — Вып. 75 (78). [отв. ред С.А. Поддубный]. — Ярославль: Филигрань, 2016. — С. 30—40.
9. *Законнов В.В., Законнова А.В.* Балансы взвешенных веществ водохранилищ Волги и их трансформация: Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Инженерная геология, гидрология и геодинамика прибрежных территорий и ложа водохранилищ». — Пермь: Перм. гос. ун-т, 2008. — С. 93—99.
10. *Законнов В.В., Законнова А.В.* Географическая зональность осадкообразования в системе волжских водохранилищ // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2008. — № 2. — С. 105—111.
11. *Запольский И.А., Еськов Б.Г.* Распределение, мощность и некоторые физико-химические свойства донных отложений Киевского водохранилища // Гидробиол. журн. — 1976. — Т. 12, № 2. — С. 22—30.
12. *Клюева В.А., Долженко Г.П.* Осадконакопление в водохранилищах бассейна Нижнего Дона. — Ростов-н/Д.: Изд-во Ростовского ун-та, 1983. — 144 с.
13. *Матарзин Ю.М., Мацкевич И.К., Сорокина Н.Б.* О формировании рельефа дна Камских водохранилищ // Уч. зап. Перм. ун-та. — 1968. — № 198. — С. 92—111.
14. *Новиков Б.И.* Донные отложения днепровских водохранилищ. — Киев: Наук. думка, 1985. — 169 с.
15. *Новиков Б.И., Тимченко В.М., Сипченко П.В.* Седиментационные процессы в каскадах равнинных водохранилищ Украины // Взаимодействие между водой и седиментами в озерах и водохранилищах. — Л.: Наука, 1984. — С. 18—26.

16. Тімченко В.М., Линник П.М., Холодько О.П. *и др.* Абіотичні компоненти екосистеми Київського водосховища. — Київ: Логос.— 2013. — 60 с.
17. Тимченко В.М., Холодько О.П. Взвешенное вещество и донные отложения Киевского водохранилища // Гідроенергетика України. — 2014. — № 2—3. — С. 32—36.
18. Шамов Г.И. Заиление водохранилищ. — Л.: Гидрометеиздат, 1939. — 139 с.
19. Широков В. М. Современные процессы формирования донных осадков // Инженерно-географические проблемы проектирования и эксплуатации крупных равнинных водохранилищ. — М.: Наука, 1972. — С. 29—35.
20. Edelstein K.K. Hydrology peculiarities of valley reservoirs // Int. rev. gesamt. Hydrobiol. — 1995. — Vol. 80.1. — P. 27—48.

¹ Институт биологии внутренних вод, Борок, РФ

² Институт гидробиологии НАН Украины, Киев

Поступила 12.06.17