

DOI: 10.37279/2309-7663-2020-6-4-139-153

УДК 551.312:546.18:556.55

Е. В. Гатальская,
Н. А. Белкина

Особенности накопления фосфора в донных отложениях Иваньковского водохранилища

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
г. Петрозаводск, Республика Карелия, Российская
Федерация
e-mail: katusha9210@yandex.ru

Аннотация. Изучено распределение фосфора в донных отложениях Иваньковского водохранилища, формы фосфора и его содержание в разных размерных фракциях осадка. Показано, что основная часть фосфора находится в минеральной форме и содержится в составе глинистой фракции осадка, что усиливает риск вторичного загрязнения фосфором вод, за счет его поступления из донных отложений во взвешенной форме в активных динамических зонах водохранилища. Выполнена оценка диффузионного поступления растворимых форм фосфора из донных отложений аккумуляционных зон водохранилища.

Ключевые слова: водохранилище, фосфор, донные отложения, фракционный состав, динамические зоны.

Введение

Фосфор является биогенным элементом, необходимым для нормального функционирования животных и растительных организмов. Его соединения, присутствующие во всех живых клетках, участвуют в физиологических и биохимических процессах роста и деления клеток, хранения генетической информации и обмена веществом и энергией. В водоеме фосфор, лимитирующий развитие водной растительности и гидробионтов, определяет трофический статус экосистемы. Увеличение содержания фосфора в воде способствует эвтрофированию и сопровождается усиленным развитием фитопланктона, прибрежных зарослей, водорослей, цветением воды.

Иваньковское водохранилище образовано в 1937 г. в результате перекрытия русла р. Волги у села Иваньково плотиной гидроэлектростанции. Подпор уровня воды у плотины составляет 14 м (отметка НПУ 123.89 м БС), полный объем водохранилища — 1,12 км³, полезный — 0,1 км³, площадь зеркала при НПУ — 327 км², длина — 27 км, наибольшая ширина составляет 8 км, средняя — 5,9 км, средняя глубина при НПУ — 3,3 м [1].

Основным назначением водохранилища является сезонное регулирование стока р. Волги для бесперебойного снабжения водой системы каналов Москвы, через которую поступает около 70% всей воды, потребляемой в настоящее время населением и промышленностью г. Москвы. Кроме того, водные ресурсы водохранилища используются в качестве основного источника водоснабжения г. Твери, ряда других менее крупных городов.

Водохранилище испытывает достаточно серьезное антропогенное воздействие. В его бассейне имеется 145 выпусков сточных вод, 27 из них

расположены непосредственно в водоохранной зоне [2]. Одной из экологических проблем водохранилища является эвтрофирование. Вторичное загрязнение биогенными элементами из донных отложений усиливает эти процессы. Так, по оценкам С. П. Китаева, внутренняя фосфорная нагрузка в Ивановском водохранилище составляет 83% от внешней и оценивается в $1,664 \text{ г/м}^2$ в год [3]. Донные отложения аккумулируют фосфор, поступающий главным образом с детритным материалом. Фосфор может возвращаться в воду в составе взвешенного материала в результате взмучивания донных отложений или в растворенной форме в результате процессов разложения органического вещества, что способствует дальнейшему развитию процессов эвтрофирования в водоёме. Несбалансированная эвтрофикация может приводить к бурному развитию водорослей и появлению в воде цианобактерий, которые в период цветения выделяют токсины, способные вызвать отравление людей и животных, а также приводит к дефициту кислорода, и, как следствие, к заморам рыб. Поэтому, изучение донных отложений Ивановского водохранилища является весьма актуальным. Учеными разных специализаций было проведено множество исследований донных отложений, в результате чего накоплен большой объем данных [4, 2, 5, 6].

Целью работы является изучение особенностей накопления фосфора в донных отложениях Ивановского водохранилища.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи: (1) разработать и апробировать методику разделения донных отложений естественной влажности на размерные фракции (2) определить формы фосфора и его содержание в разных фракциях.

Материалы и методы

Водохранилище относится к долинному типу. По форме котловины, очертаниям и характеру берегов водохранилище подразделяется на 3 плеса — Ивановский, Волжский и Шошинский. В 2018 году были отобраны пробы воды и донных отложений на 6 станциях Ивановского плеса. Схема станций наблюдения представлена на рисунке 1. Выбор Ивановского плеса в качестве района работ основан на том, что здесь представлены все типы донных отложений, встречающиеся в водоеме, и залегающие в различных динамических зонах, выделенных Казмируком В. Д. [6]. Станция 2 расположена в зоне переноса, ст. 4, 6 — в зоне взмучивания, ст. 3, 5 — в зоне седиментации, ст. 1 — в застойной зоне [2]. Отбор проб проводили по стандартной методике дночерпателем Петерсона, пробоотборником Limnos, трубкой ГОИН [7].

В донных отложениях исследовали гранулометрический состав на лазерном многофункциональном анализаторе частиц LS 13 320 (фирмы Beckman Coulter, США) в ЦКП КарНЦ РАН. Физические характеристики: влажность — естественная (Wet_{20}) и абсолютная (Wet_{105}), пористость (Por), плотность (d), удельная масса ($M_{s/w}$), потери при прокаливании ($ППП_{550}$) и зольность (ZOL) определяли гравиметрическим методом [8].

Содержание фосфора минерального в донных отложениях определяли фотометрическим методом после его экстракции, при кипячении грунта естественной влажности в водном растворе $1N \text{ H}_2\text{SO}_4$ [9]. Валовый фосфор в донных отложениях определялся методом Кьельдаля [8].

Содержание фосфора в воде и поровых водах определялось фотометрическим методом Морфи и Райли [10].

Взвешенное вещество вод отделялось прибором вакуумного фильтрования ПВФ — 47/6 НБ ПП [11] с помощью мембранных фильтров 0,9 мкм и 0,45 мкм. Поровые воды выделялись на станциях 1, 3, 5 — 25 минут при скорости 3 000 об/мин, с помощью центрифуги MSE GWB, впоследствии, в этих пробах определяли содержание $P_{\text{общ}}$ и $P_{\text{мин}}$.

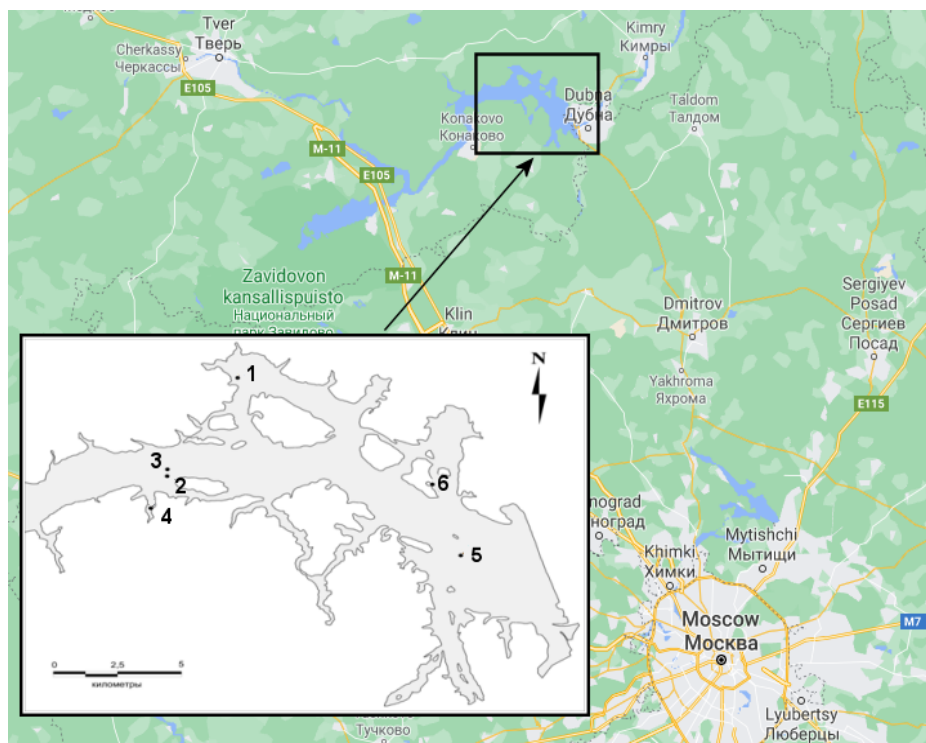


Рис. 1. Схема станций наблюдения на Иваньковском водохранилище

Фракционирование фосфора донных отложений.

Разделение донных отложений на размерные фракции проводилось на основе ГОСТа 12536–2014. Были выделены фракции: мелкопесчаная (\varnothing от 250 до 100 мкм), иловая (\varnothing от 100 до 50 мкм), глинистая (\varnothing от 50 до 1 мкм), коллоидная (\varnothing от 1 до 0,45 мкм).

Отделение песчаной фракции производили, пропуская пробу донных отложений естественной влажности через набор сит с разными диаметрами 10, 5, 2, 1, 0,25, 0,1 мм.

Для отделения фракции ила, суспензию, оставшуюся после фильтрования осадка через сито \varnothing 0,1 мм и промывные воды, пропускали через сито \varnothing 0,05 мм, промывали и количественно переносили осадок, оставшийся на сите в предварительно взвешенную тару.

В осадках, оставшихся на ситах, после высушивания определяли валовое содержание фосфора.

Отделение глинистой фракции проводили методом суспензирования. Пробу донных отложений тщательно перемешали, разделили на 5 равных частей, поместили в предварительно взвешенный цилиндр и взвесили цилиндр с осадком. По разнице весов нашли массу донных отложений. В каждый цилиндр добавили

дистиллированную воду до точного объема (1 л). Донные отложения перемешали до полного взмучивания осадка со дна цилиндра в течение 1 минуты и оставили в покое до момента взятия пробы. Время отбора проб суспензии после начала отстаивания следует определять в зависимости от плотности частиц грунта и температуры [12]. Продолжительность наполнения пипетки суспензией и объем отбираемой пробы находятся в зависимости от размера частиц [12]. Отделение глинистой фракции можно проводить методом ситования при достаточном ее содержании (10%) в донных отложениях. Суспензию, оставшуюся после фильтрования и промывки пробы донных отложений после сита $\varnothing 0,05$ мм пропустили через сито $\varnothing 0,01$ мм.

Отделение коллоидной фракции проводили методом последовательного фильтрования суспензий, оставшихся после выделения глинистой фракции, через мембранные фильтры 0,9 мкм и 0,45 мкм соответственно.

Результаты и обсуждение

Содержание $P_{\text{мин}}$ в воде водохранилища колеблется в пределах от 5 до 75 мкг/л. Концентрация $P_{\text{общ}}$ — от 93 до 266 мкг/л (табл. 1). По классификации [13], Ивановское водохранилище можно отнести к высокоэвтрофным водоёмам (среднее значение $P_{\text{общ}} = 147$ мкг/л). Минимальные значения концентраций $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{общ}}$ в воде водохранилища были зафиксированы в поверхностных горизонтах в зоне взмучивания (ст. 4, ст. 6). Максимум содержания отмечен в придонных горизонтах в зоне седиментации (ст. 3, ст. 5), что указывает на возможность поступление фосфора из донных отложений. Концентрации обеих форм фосфора увеличивается с глубиной водоема.

Таблица 1

Содержание фосфора общего и минерального в воде Ивановского водохранилища

№ ст	Н	L	$P_{\text{мин}}$	$P_{\text{общ}}$
	м	м	мкг/л	мкг/л
1	2,2	1,5	20	—
		1,9	15	120
3	13	0,5	25	97
		12	68	166
		12,4	73	—
		12,8	75	266
4	1,2	0,3	30	109
		0,7	32	93
5	16	0,5	26	174
		15	33	105
		15,8	57	224
6	1	0,5	5	115

Составлено авторами

Донные отложения Иваньковского водохранилища изучались в различные периоды его истории. [2, 14, 15, 16, 17, 18, 5]. На начальном этапе существования водоема, на дне доминировали различные виды первичных трансформированных почв. Более 40% площади дна занимали почвы, разбухшие и заболоченные. Постепенно доля первичных грунтов сокращалась (в настоящее время она не превышает 1%) и увеличивалась доля площадей, занятых вторичными осадками (пески, илистые пески, торфянистые илы, детритовые илы и др.) [2, 18]. Для распределения донных отложений по акватории Иваньковского плёса, выбранного в качестве модельного участка водохранилища, характерна четкая дифференциация осадков различного гранулометрического состава по глубине залегания. В мелководной зоне открытой части плеса (глубина ≤ 3 м) преобладают песок, песок илистый (зона взмучивания) и ил песчаный (зона переноса). В закрытых от волнения заливах северной и южной частей на этой же глубине залегает торфянистый ил и отложения, сформированные в основном высшей водной растительностью (застойная зона водохранилища). В интервале глубин от 3 до 9 м преимущественно залегают песчанистые серые илы. Дно русловой ложбины (глубина > 9 м, зона седиментации) почти полностью покрыто серым илом, толщина слоя которого достигает 1,2 м. Иногда встречаются плотные отложения из ракуши.

Стратиграфическое описание колонок донных отложений, отобранных на Иваньковском плесе, представлено в таблице 2 и на рис. 2, 3. Анализ гранулометрического состава исследованных донных отложений показал, что в осадках в зоне переноса (ст. 2) преобладает песчаная фракция ($\varnothing > 250$ мкм). В зоне взмучивания (ст. 4, 6) залегают мелкопесчаные и илистые донные отложения ($50 < \varnothing < 250$ мкм). Глинистая фракция ($1 < \varnothing < 50$ мкм) доминирует в осадках зоны седиментации (ст. 3, 5) и в донных отложениях застойной зоны (ст. 1) (табл. 3, рис. 4).

Значения физико-химических показателей, физические и химические характеристики донных отложений представлены в таблице 4, 5.

Таблица 2

Стратиграфическое описание донных отложений Иваньковского водохранилища

№ ст.	Глубина, м	Описание
1	2,2	Серый мелкодисперсный ил. Ниже 5 см встречаются полости диаметром 1,5–2 см
2	3,0	0–9 см — песок с крупными ракушками дрейсены, 9–15 см — заиленный (черный) мелкий песок, 15–25 см — крупнозерный песок с битой ракушкой и растительными остатками, 25–33 см — коричнево–серый песок с растительными волокнами
3	13,0	Серый ил с черными примазками
4	1,2	Темный ил с мелким песком
5	16,0	0–50 см — темный серый ил, 50–60 см серо–коричневый ил, 60–80 см темно–коричневый ил, ниже 80 см более тонкий серо–черный ил
6	1,0	Темно–серый ил

Составлено авторами



Рис. 2. Колонка донных отложений на ст. 2



Рис. 3. Колонка донных отложений на ст. 1

Таблица 3

Гранулометрический состав донных отложений Иваньковского плеса, %

Фракция	Размер зерна мкм	Станция					
		1	2	3	4	5	6
песок	> 250	0,0	43,6	0,0	0,0	0,0	8,3
мелкий песок	250–100	0,3	25,4	4,3	38,4	1,3	19,1
ил	100–50	11,7	3,9	12,7	32,0	16,1	50,2
глина	50–1	86,8	26,4	81,7	28,7	81,1	22,0
коллоид	< 1	1,2	0,7	1,3	1,4	1,5	0,4

Составлено авторами

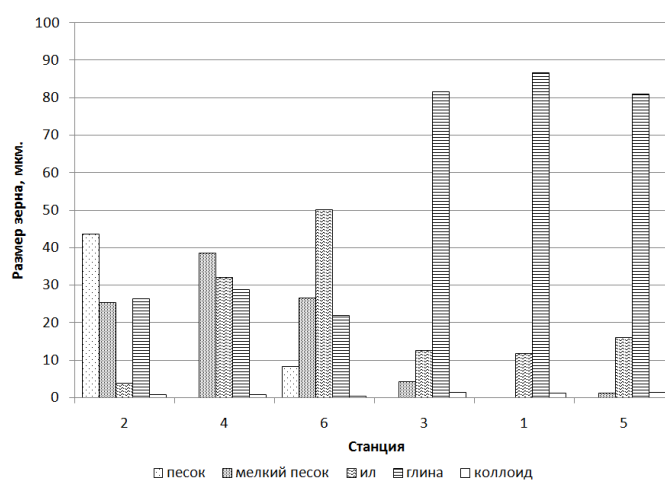


Рис. 4. Гранулометрический состав донных отложений Иваньковского плеса

Составлено авторами

Грубые песчаные осадки ст. 2 имеют наибольшую плотность и удельную массу (2,3 г/мл и 3,4 г/см³) и наименьшее значение пористости (0,44) (табл. 4). Минимальные значения плотности и удельной массы зафиксированы в пелитовых осадках ст. 5 (1,1 г/мл и 1,4 г/см³), которые соответствуют наибольшему значению пористости (0,82). Что является логичным и согласуется с общеустановленными соотношениями физических характеристик осадочного вещества: чем больше показатели плотности, тем ниже значение пористости, и наоборот [19, 20].

Результаты изучения химического состава донных отложений Иваньковского водохранилища показали, что все изученные осадки можно отнести к минеральному типу в соответствии с [21]: среднее значение ППП равно 15% и зольности — 80% (табл. 5). В осадках станций 2 и 4, обладающих наибольшей удельной массой, наблюдается меньшее содержание органического вещества (4%, см. табл. 4). Что также является закономерным, поскольку удельная масса донных отложений изменяется в соответствии с различным неорганическим и органическим составом, повышаясь у осадков, содержащих большое количество минеральных веществ, и, наоборот, понижаясь с увеличением в осадках органических веществ [20].

Содержание $P_{\text{общ}}$ в донных отложениях водохранилища изменяется от 0,12% (ст. 6) до 0,61% (ст. 2) (см. табл. 5). Диапазон концентраций $P_{\text{мин}}$ (наиболее биологически доступная форма фосфора способная к ионному обмену на границе вода–дно) в осадках достаточно широкий — от 0,016% на станции 2, где преобладает песчаная фракция до 0,16% на станции 3, где преобладает глинистая фракция (см. табл. 5). Что также подтверждает общеустановленный факт, что пески обладают наименьшей сорбционной способностью по отношению к фосфору по сравнению с илами и глинами [22, 23].

Таблица 4

Физические характеристики поверхностного слоя донных отложений Иваньковского плеса

№ ст	Слой, см	Масса, г	Wet ₂₀ , %	Wet ₁₀₅ , %	Por	d, г/мл	M _{s/w} , г/см ³
1	0 5	0,2284	79,8	6,59	0,856	1,1308	1,5859
2	0 9	1,8862	18,94	0,52	0,44	2,3270	3,3803
3	0 5	0,2189	80,5	5,72	0,857	1,1225	1,5309
4	0 5	0,6983	50,67	1,90	0,68	1,4158	2,1822
5	0 5	0,2555	77,1	7,03	0,816	1,1155	1,3884
6	0 5	0,2319	79,51	4,51	0,85	1,1318	1,5776

Составлено авторами

Таблица 5

Химический состав поверхностного слоя донных отложений Иваньковского плеса

№ ст	Слой, см	ППП ₅₅₀ , %	ZOL, %	P _{мин} , %	P _{общ} , %
1	0 5	18,63	76,94	0,09	0,606
2	0 9	1,70	85,84	0,016	0,617
3	0 5	15,71	79,68	0,16	0,341
4	0 5	5,44	90,55	0,024	0,151
5	0 5	16,55	77,78	0,145	0,257
6	0 5	21,55	75,30	0,032	0,124

Составлено авторами

Изучение концентрационного распределения валового фосфора в донных отложениях в зависимости от размерной фракции осадка показало, что основная его часть депонирована в глинистой фракции с размером частиц от 50 до 10 мкм. Максимальная абсолютная концентрация $P_{\text{общ}}$ (0,7%, что соответствует 83% от валового его содержания) в этой фракции зафиксирована на ст. 1 (табл. 6). Минимальная абсолютная концентрация элемента (диапазон колебаний от 0% на ст. 1 и 3 до 0,07% на ст. 5) наблюдается во фракции мелкого песка ($100 < \varnothing < 250$ мкм), где его содержание от $P_{\text{общ}}$ не превышало 5%. Необходимо также отметить, что во фракции с размером зерен более 250 мкм присутствие фосфора наблюдалось только в донных отложениях мелководья, что, скорее всего, связано с детритом высшей водной растительности (ст. 4, ст. 6) и с жизнедеятельностью двусторчатых моллюсков семейства дрейссенид (ст. 2), являющихся фильтраторами, остатки раковин которых в большом количестве обнаружены в донных отложениях этой станции (см. табл. 2, см. рис. 2). Сравнение абсолютных концентраций фосфора, накопленного в каждой из выделенных гранулометрических фракций донных отложений, показало, что на ст. 2 и 6 наибольшее количество $P_{\text{общ}}$ и $P_{\text{мин}}$ содержится в коллоидной форме (7,7 и 5,2%; 3 и 1,6% соответственно). На ст. 1, 3, 4, 5 наибольшие концентрации $P_{\text{общ}}$ и $P_{\text{мин}}$ обнаружены в частицах с размером $1 < \varnothing < 2$ мкм (4,7 и 3,9%; 2,7 и 2,6%; 2,5 и 1,6%; 1,3 и 1,2% соответственно) (рис. 5).

Необходимо отметить, что в динамически активных зонах в Иваньковском водохранилище, взмучивание мелкодисперсных частиц крупностью $d < 0,005$ мм происходит при скорости ветра 2–3 м/с. Изучение распределения взвешенного вещества в воде, проведенное ранее Казмируком В. Д., показывает в период открытой воды высокие значения мутности вод придонных горизонтов в зоне переноса и зоне взмучивания. Обычно, усиление ветра до 10 м/с приводит к резкому увеличению мутности вод. В условиях Иваньковского водохранилища наиболее неблагоприятными являются ветры западного направления (повторяемость 17–23%) [5]. Следовательно, высокое содержание фосфора (особенно его подвижных минеральных форм) в глинистой и коллоидной фракциях донных отложений указывает на потенциальную опасность вторичного загрязнения этим элементом при его поступлении из донных отложений обратно в воду в результате взмучивания осадка [23].

Таблица 6

Концентрации фосфора общего и минерального в разных размерных фракциях донных отложений Иваньковского водохранилища, %

№ ст.	Фракция, мкм	$P_{\text{мин}}$	$P_{\text{общ}}$	Доля от валового фосфора
1	2	3	4	5
1	> 250	–	0,00	0,000
	250–100	–	–	–
	100–50	–	0,19	0,037
	50–10	1,3	0,7	0,834
	10–5	0,2	0,2	0,038
	5–2	0,6	0,8	0,034
	2–1	3,9	4,7	0,030
	<1	1,2	1,3	0,027

Продолжение таблицы 6

1	2	3	4	5
2	> 250	—	0,01	0,007
	250–100	—	0,01	0,004
	100–50	—	0,02	0,001
	50–10	1	1,5	0,392
	10–5	1,6	2,2	0,235
	5–2	3,4	3,7	0,150
	2–1	4,9	6,8	0,127
	< 1	5,2	7,7	0,082
3	> 250	—	0,00	0,000
	250–100	—	—	—
	100–50	—	—	—
	50–10	0,2	0,4	0,767
	10–5	0,2	0,2	0,072
	5–2	0,6	0,6	0,059
	2–1	2,6	2,7	0,054
	<1	1,1	1,2	0,047
4	> 250	—	0,01	0,000
	250–100	—	0,02	0,051
	100–50	—	0,01	0,021
	50–10	0,4	0,4	0,578
	10–5	0,2	0,2	0,064
	5–2	0,4	0,6	0,068
	2–1	1,6	2,5	0,070
	< 1	0,9	1,5	0,147
5	> 250	—	0,00	0,000
	250–100	—	0,07	0,004
	100–50	—	0,18	0,113
	50–10	0,2	0,3	0,721
	10–5	0,1	0,1	0,056
	5–2	0,2	0,2	0,034
	2–1	1,2	1,3	0,037
	<1	0,5	0,6	0,035
6	> 250	—	0,07	0,047
	250–100	—	0,02	0,031
	100–50	—	0,03	0,121
	50–10	0,2	0,3	0,387
	10–5	0,3	0,4	0,129
	5–2	0,8	1,1	0,107
	2–1	1,1	1,5	0,090
	< 1	1,6	3	0,086

Составлено авторами

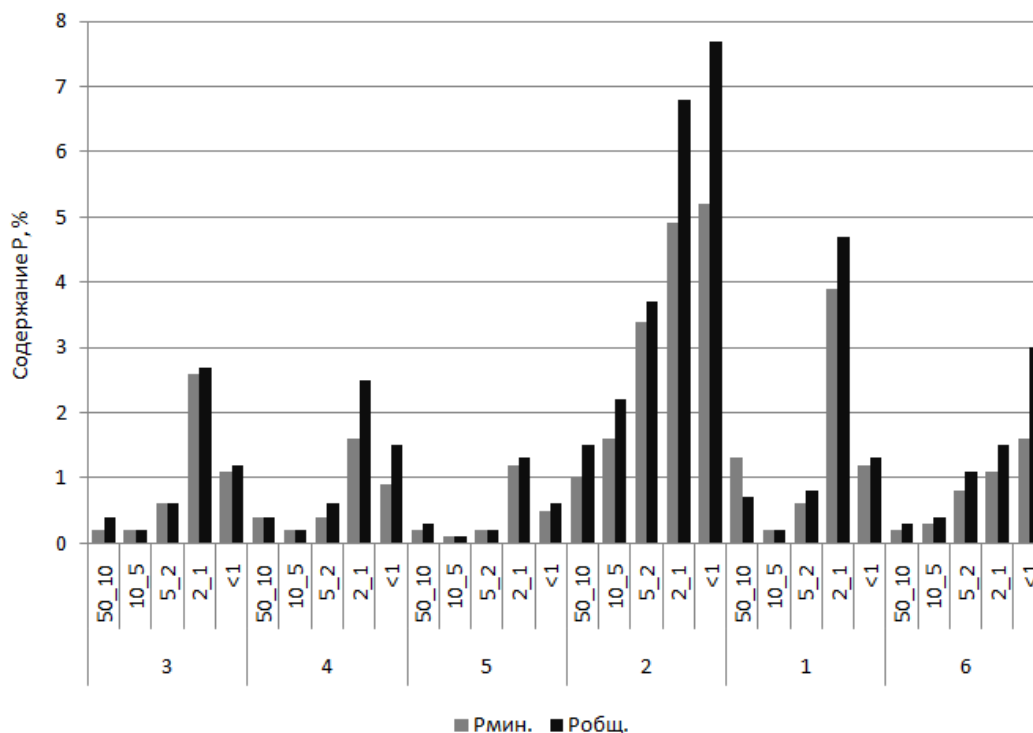


Рис. 5. Распределение фосфора в глинистой фракции донных отложений
Иваньковского водохранилища

Составлено авторами

Вертикальное распределение фосфора в колонках донных отложений изучалось на станциях 1, 3, 5 (рис. 6). Вид концентрационного профиля $P_{мин}$ идентичен распределению $P_{общ}$. Так, на ст. 5 локальные максимумы $P_{мин}$ и $P_{общ}$ наблюдаются на глубинах 4, 10, 28 см, а минимум — на глубине 8 см. На станции 3 содержание фосфора монотонно падает с глубиной, а на ст. 1 на фоне снижения концентраций фосфора в осадке фиксируется локальный минимум на глубине 10 см (см. рис. 6). Основная часть фосфора находится в минеральных, наиболее подвижных и биодоступных минеральных формах.

Распределение фосфора в поровых водах донных отложений ст. 1, 3 и 5 имеет неравномерный характер. Вид концентрационного профиля элемента в поровых водах ст. 5 повторяет распределение форм фосфора в колонке донных отложений на рис. 6: максимумы содержания на глубине 2, 8 и 28 см и локальный минимум на глубине 8 см (см. рис 7).

В отличие от распределения фосфора в донных отложениях, на концентрационных профилях в поровых водах ст. 1 и 3 наблюдаются ярко выраженные максимумы на глубине 6 см. Диапазон изменения концентраций достаточно широкий — от 17 до 365 мкг/л для $P_{общ}$ и от 2 до 217 мкг/л для $P_{мин}$. Максимальное значение содержания фосфора ($P_{общ}$ и $P_{мин}$) в поровых водах отмечено на ст. 1 на глубине 6 см, минимальное — на ст. 3 на глубине 16 см.

Высокие градиенты концентраций фосфора в поровых водах и формы профилей (наличие выраженных максимумов) свидетельствуют о формировании потока растворимых минеральных форм фосфора из донных отложений в водную толщу. На основе концентрационных градиентов в поровых водах по модели

Фика было рассчитано диффузионное поступление фосфора из донных отложений ст. 1, 3 и 5 (табл. 7):

$$J = -D \cdot \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

$$D = D^0 \cdot \rho_{\theta} \quad (2)$$

где J — диффузионный поток ($г \cdot м^{-2} \cdot сутки^{-1}$); $D = 1 \cdot 10^{-10} м^2 \cdot с^{-1}$ — коэффициент диффузии ($м^2 \cdot с^{-1}$); dC/dx — градиент концентрации ($г \cdot л^{-1} \cdot м^{-1}$).

С учетом площади зоны седиментации на акватории Иваньковского плеса (около $10 км^2$, глубина залегания $> 10 м$) диффузионный поток фосфора из донных отложений этой зоны оценивается в пределах от 0,3 до 60 т фосфора в год, что сравнимо с внешней фосфорной нагрузкой.

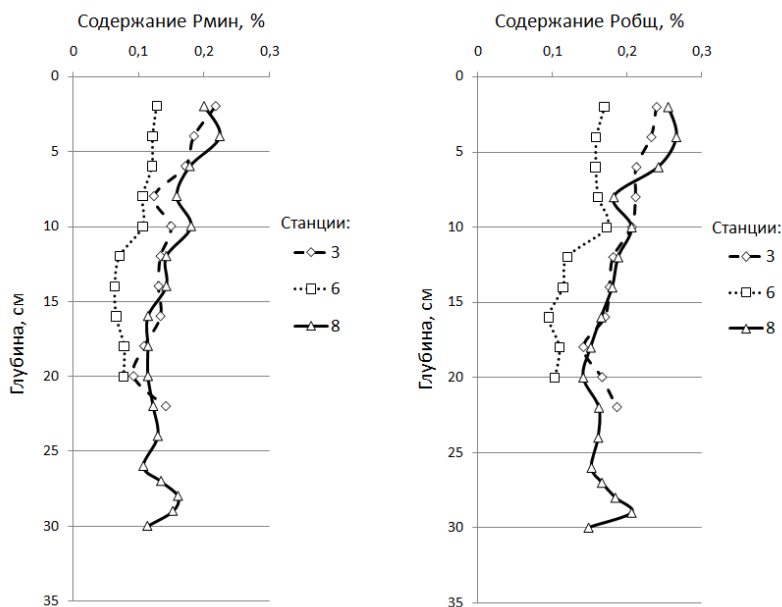


Рис. 6. Содержание $P_{мин}$ и $P_{общ}$ в донных отложениях Иваньковского плеса [24]
Составлено авторами

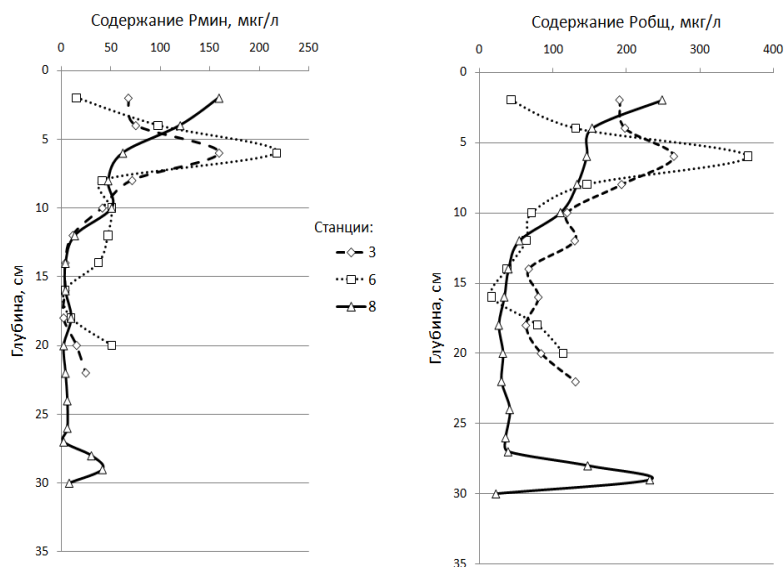


Рис. 7. Содержание $P_{мин}$ и $P_{общ}$ в поровых водах Иваньковского плеса [24]
Составлено авторами

Таблица 7

Диффузионное поступление фосфора из донных отложений Иваньковского плеса

№ ст.	$\Delta P_{\text{мин}}$	$\Delta P_{\text{общ}}$	P _{ог}	D	J _{мин}	J _{общ}	J _{мин}	J _{общ}
	мкг/л			$10^{-9} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$	$\text{мг Р} \cdot \text{м}^{-2} \text{ сутки}^{-1}$		$\text{г Р} \cdot \text{м}^{-2} \text{ год}^{-1}$	
1	213	348	0,89	4,92	0,8	1,3	0,3	0,5
3	155	197	0,82	4,53	0,6	0,8	0,2	0,3
5	146	195	0,88	4,87	0,5	0,7	0,2	0,3

Составлено авторами

Выводы

Донные отложения Иваньковского водохранилища являются минеральными осадками с относительно высоким содержанием фосфора. Гранулометрический состав осадков соответствует песчаным отложениям в зоне переноса, песчаным алевритам — в зоне взмучивания, глинистым алевритам — в зоне седиментации.

Содержание фосфора в донных отложениях высокое, наибольшие концентрации обнаружены в осадках застойной зоны. Основная часть фосфора находится в минеральной форме и содержится в составе глинистой фракции осадка, что усиливает риск вторичного загрязнения водоема взвешенными формами фосфора за счет их поступления из донных отложений в результате взмучивания.

Характер распределения фосфора в поровых водах и донных отложениях указывают на развитие процесса вторичного загрязнения водохранилища растворимыми формами фосфора.

Работа выполнена в рамках темы НИР Госзадания ИВПС КарНЦ РАН.

Литература

1. Зиминова Н. А., Былинкина А. А., Трифонова Н. А. и др. Иваньковское водохранилище и его жизнь. Л.: Наука, 1978. 305 с.
2. Бреховский В. Ф., Казмирук Т. Н., Казмирук В. Д. Донные отложения Иваньковского водохранилища: состояние, состав, свойства. М.: Наука, 2006. 176 с.
3. Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 394 с.
4. Абакумов В. А., Ахметьева Н. П., Бреховских В. Ф. и др. Иваньковское водохранилище. Современное состояние и проблемы охраны. М.: Наука, 2000. 344 с.
5. Григорьева И. Л., Ланцова И. В., Тулякова Г. В. Геоэкология Иваньковского водохранилища и его водосбора. Конаково: Булат, 2000. 248 с.
6. Казмирук В. Д., Казмирук Т. Н., Бреховских В. Ф. Зарастающие водотоки и водоемы: Динамические процессы формирования донных отложений. М.: Наука, 2004. 310 с.
7. ПНДФ 12.1:2.2:2.3.2–03 Отбор проб почв, грунтов, осадков биологических очистных сооружений, шламов промышленных сточных вод, донных

- отложений искусственно созданных водоемов, прудов–накопителей и гидротехнических сооружений. Методические рекомендации. М., 2003. 12 с.
8. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. 2–е изд. М.: МГУ, 1970. 488 с.
 9. РД 52.24.382 Массовая концентрация фосфатов и полифосфатов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом. Ростов-на-Дону. 26 с.
 10. Лозовик П. А. , Ефременко Н. А. Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике. СПб.: Нестор–История, 2017. 272 с.
 11. РД 52.24.468 Взвешенные вещества и общее содержание примесей в водах. Методика выполнения измерений массовой концентрации гравиметрическим методом. Ростов-на-Дону. 14 с.
 12. ГОСТ 12536–2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2015. 19 с.
 13. Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию. Петрозаводск, 2006. 59 с.
 14. Кудрин В. П. Грунты Иваньковского водохранилища // Труды Института биологии водохранилищ АН СССР. 1961. Вып. 4 (7). С. 328–346.
 15. Иваньковское водохранилище и его жизнь / Под. ред. Н. В. Буторина. Л.: 1978. 305 с.
 16. Иваньковское водохранилище: современное состояние и проблемы охраны. М.: Наука, 2000. 344 с.
 17. Буторин Н. В., Курдина Т. Н. Новые данные о характере переноса вод в Иваньковском водохранилище // Биология внутренних вод. 1970, № 8. С. 70–74.
 18. Законнов В. В., Зиминова Н. А. Балансы биогенных элементов в водохранилищах Верхней Волги // Взаимодействие между водой и седиментами в озерах и водохранилищах. Л.: Наука, 1984. С. 114–122.
 19. Куликов Я. К. Почвенные ресурсы: учебное пособие. Минск: Выш. шк., 2013. 319 с.
 20. Зайков Б. Д. Очерки по озероведению. Часть 2. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 240 с.
 21. ГОСТ 23740–2016 Грунты. Методы определения содержания органических веществ. М.: Стандартинформ, 2017. 10 с.
 22. Третьякова Е. И., Ильина Е. Г., Бурлуцкая Е. В. Изучение факторов, влияющих на содержание фосфора в донных отложениях Новосибирского водохранилища // Известия АлтГУ. 2011. Т. 2, № 3. С. 132–137.
 23. Белкина Н. А., Казмирук В. Д., Потахин М. С. Поступление фосфора из донных отложений Иваньковского водохранилища в составе взвешенного вещества // Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Материалы II Международной конференции. Казань, 2019. С. 33–38.
 24. Гатальская Е. В., Белкина Н. А. Фосфор в донных отложениях Иваньковского водохранилища // Водные ресурсы: изучение и управление (школа–практика). Материалы VI Международной конференции молодых ученых. Петрозаводск, 2020. С. 143–146.

**E. Gatafskaya,
N. Belkina** | *Features of phosphorus accumulation in the bottom sediments
of the Ivankovo reservoir*

Northern Water Problems Institute Karelian Research Centre
Russian Academy of Sciences,
Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russian Federation
e-mail: katusha9210@yandex.ru

Abstract. *The distribution of phosphorus in the bottom sediments of the Ivankovo reservoir, the forms of phosphorus and its content in different size fractions of the sediment were studied. It is shown that the main part of phosphorus is in mineral form and is contained in the clay fraction of sediment, which increases the risk of secondary pollution of water with phosphorus, due to its flow from bottom sediments in suspended form in the active dynamic zones of the reservoir. The estimation of the diffusion input of soluble forms of phosphorus from the bottom sediments of the reservoir accumulation zones was performed.*

Keywords: *reservoir, phosphorus, bottom sediments, fractional composition, dynamic zones.*

References

1. Ziminova N. A., By`linkina A. A., Trifonova N. A. i dr. Ivan`kovskoe vodoxranilishhe i ego zhizn`. L.: Nauka, 1978. 305 s. (in Russian)
2. Brexovskij V. F., Kazmiruk T. N., Kazmiruk V. D. Donny`e otlozheniya Ivan`kovskogo vodoxranilishha: sostoyanie, sostav, svojstva. M.: Nauka, 2006. 176 s. (in Russian)
3. Kitaev S. P. Osnovy` limnologii dlya gidrobiologov i ixtiologov. Petrozavodsk: KarNCz RAN, 2007. 394 s. (in Russian)
4. Abakumov V. A., Axmet`eva N. P., Brexovskix V. F. i dr. Ivan`kovskoe vodoxranilishhe. Sovremennoe sostoyanie i problemy` oxrany`. M.: Nauka, 2000. 344 s. (in Russian)
5. Grigor`eva I. L., Lanczova I. V., Tulyakova G. V. Geoe`kologiya Ivan`kovskogo vodoxranilishha i ego vodosbora. Konakovo: Bulat, 2000. 248 s. (in Russian)
6. Kazmiruk V. D., Kazmiruk T. N., Brexovskix V. F. Zarastayushhie vodotoki i vodoemy`: Dinamicheskie processy` formirovaniya donny`x otlozhenij. M.: Nauka, 2004. 310 s. (in Russian)
7. PNDF 12.1:2:2.2:2.3.2–03 Otbor prob pochv, gruntov, osadkov biologicheskix ochistny`x sooruzhenij, shlamov promy`shlenny`x stochny`x vod, donny`x otlozhenij iskusstvenno sozdanny`x vodoemov, prudov–nakopitelej i gidrotexnicheskix sooruzhenij. Metodicheskie rekomendacii. M., 2003. 12 s. (in Russian)
8. Arinushkina E. V. Rukovodstvo po ximicheskomu analizu pochv. 2–e izd. M.: MGU, 1970. 488 s. (in Russian)
9. RD 52.24.382 Massovaya koncentraciya fosfatov i polifosfatov v vodax. Metodika vy`polneniya izmerenij fotometricheskim metodom. Rostov-na-Donu. 26 s. (in Russian)
10. Lozovik P. A., Efremenko N. A. Analiticheskie, kineticheskie i raschetny`e metody` v gidroximicheskoy praktike. SPb.: Nestor–Istoriya, 2017. 272 s. (in Russian)

11. RD 52.24.468 Vzveshenny'e veshhestva i obshhee sodержanie primesej v vodax. Metodika vy'polneniya izmerenij massovoj koncentracii gravimetricheskim metodom. Rostov-na-Donu. 14 s. (in Russian)
12. GOST 12536–2014 Grunty'. Metody' laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo (zernovogo) i mikroagregatnogo sostava. M.: Standartinform, 2015. 19 s. (in Russian)
13. Lozovik P. A. Gidrogeoximicheskie kriterii sostoyaniya poverxnostny'x vod gumidnoj zony' i ix ustojchivosti k antropogennomu vozdejstviyu. Petrozavodsk, 2006. 59 s. (in Russian)
14. Kudrin V. P. Grunty' Ivan'kovskogo vodoxranilishha // Trudy' Instituta biologii vodoxranilishh AN SSSR. 1961. Vy'p. 4 (7). S. 328–346. (in Russian)
15. Ivan'kovskoe vodoxranilishhe i ego zhizn' / Pod. red. N. V. Butorina. L.: 1978. 305 s. (in Russian)
16. Ivan'kovskoe vodoxranilishhe: sovremennoe sostoyanie i problemy' oxrany'. M.: Nauka, 2000. 344 s. (in Russian)
17. Butorin N. V., Kurdina T. N. Novy'e dannye o xaraktere perenosa vod v Ivan'kovskom vodoxranilishhe // Biologiya vnutrennix vod. 1970, № 8. S. 70–74. (in Russian)
18. Zakonnov V. V., Ziminova N. A. Balansy' biogenny'x e'lementov v vodoxranilishhax Verxnej Volgi // Vzaimodejstvie mezhdu vodoj i sedimentami v ozerax i vodoxranilishhax. L.: Nauka, 1984. S. 114–122. (in Russian)
19. Kulikov Ya. K. Pochvenny'e resursy': uchebnoe posobie. Minsk: Vy'sh. shk., 2013. 319 s. (in Russian)
20. Zajkov B. D. Oчерки po ozerovedeniyu. Chast' 2. L.: Gidrometeoizdat, 1960. 240 s. (in Russian)
21. GOST 23740–2016 Grunty'. Metody' opredeleniya sodержaniya organicheskix veshhestv. M.: Standartinform, 2017. 10 s. (in Russian)
22. Tret'yakova E. I., Il'ina E. G., Burluczskaya E. V. Izuchenie faktorov, vliyayushhix na sodержanie fosfora v donny'x otlozheniyax Novosibirskogo vodoxranilishha // Izvestiya AltGU. 2011. T. 2, № 3. S. 132–137. (in Russian)
23. Belkina N. A., Kazmiruk V. D., Potaxin M. S. Postuplenie fosfora iz donny'x otlozhenij Ivan'kovskogo vodoxranilishha v sostave vzveshennogo veshhestva // Oзера Evrazii: problemy' i puti ix resheniya. Materialy' II Mezhdunarodnoj konferencii. Kazan', 2019. S. 33–38. (in Russian)
24. Gatal'skaya E. V., Belkina N. A. Fosfor v donny'x otlozheniyax Ivan'kovskogo vodoxranilishha // Vodny'e resursy': izuchenie i upravlenie (shkola–praktika). Materialy' VI Mezhdunarodnoj konferencii molody'x ucheny'x. Petrozavodsk, 2020. S. 143–146. (in Russian)

Поступила в редакцию 14.11.2020 г.