

Гидрология и гидрохимия

УДК 553.973(285.2:47)

ЭВОЛЮЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОЗЕРА НЕРО ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА САПРОПЕЛЯ

В. В. Законнов¹, Ш. Р. Поздняков², С. А. Кондратьев², Н. В. Игнатьева²,
А. И. Цветков¹, А. В. Законнова¹

¹Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН,
152742, пос. Борок, Некоузский р-н, Ярославская обл. e-mail: zak@ibiw.ru

²Институт озерадения РАН,
196105, г. Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, 9, e-mail: tbgmaster@mail.ru
Поступила в редакцию: 1.08.2020

В статье представлена характеристика сапропеля по результатам анализов на 21 станции оз. Неро. Дана оценка его современного состояния по гидро-физико-химическим показателям. Послойный (0–10, 30–40 и 60–70 см) гранулометрический состав стратиграфических кернов позволил сравнить эволюционное развитие озера, соответствующее по времени периодам 100, 300–400 и 600–800 лет назад. Установлено, что природные гидродинамические процессы (ветровые волны и ветровые течения) размывают и перемешивают поверхностный (0–10 см) загрязненный слой сапропеля с чистыми нижележащими горизонтами, и выносят сорбированные на взвесах поллютанты за пределы озера. Используемый подход позволил выявить пути становления мелководной озерной экосистемы и наметить перспективные направления ее восстановления и использования.

Ключевые слова: озерная экосистема, донные отложения – сапропель, гидро-физико-химические показатели, ретроспективная оценка.

DOI: 10.47021/0320-3557-2020-7-18

ВВЕДЕНИЕ

Донные отложения – это не только важнейший абиотический компонент водных экосистем, но и биотический фактор круговорота веществ, пищевой объект и среда обитания гидробионтов. В их формировании, распределении и качественном составе принимают активное участие гидродинамические, гидробиологические, биохимические процессы, а также антропогенные факторы, связанные с загрязнением промышленными, бытовыми и сельскохозяйственными стоками, режимом эксплуатации водного объекта. Мелководность ($h_{\text{ср.}} = 1.6$ м) и большая площадь ($F = 57.8$ км²)

оз. Неро способствуют вторичному поступлению донных отложений (ДО) в водную массу ($V = 0.09$ км³) под воздействием ветрового волнения, ветровых и стоковых течений, что ухудшает качество воды и в целом сказывается на продуктивности экосистемы, делая ее гиперτροφной [Бикбулатов и др., 2003 (Bikbulatov et al., 2003)].

Цель настоящей работы – всесторонняя характеристика донных отложений – сапропеля, раскрывающая эволюционное развитие озера под воздействием природных и антропогенных факторов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Методическая основа исследования подробно описана в монографии [Состояние экосистемы..., 2008 (Sostoyanie ekosistemy..., 2008)]. Отбор проб проводился летом 2017 г. по закрепленной сетке стандартных станций, с указанием координат по принципу поперечных разрезов и под ассоциациями различных видов водной растительности (рис. 1). При этом использовался легкий дночерпатель Экмана-Берджа, позволивший отобрать образцы поверхностного слоя сапропеля 0–10 см, что примерно соответствует вековому накоплению донных отложений. Выбор стратиграфических станций определился по результатам гранулометрического анализа отложений, исходя из характеристик пространственного пе-

реноса взвеси по акватории, начиная от устьевых участков р. Сары и 20 малых рек, а также антропогенных стоков г. Ростова по направлению к истоку р. Вексы. Кроме того, принималась во внимание повышенная токсичность сапропеля на станциях 04, 05, 07, 15. Дополнительно были обследованы еще 3 станции (02, 10, 12) вне зоны влияния антропогенных стоков города на границе сплошных зарослей макрофитов или в их разреженной части. На первых четырех станциях керны подняты с помощью метрового батометра из органического стекла на всю его высоту с участием аквалангиста (рис. 2). Мощность кернов составляет до 1 м. Поверхностный слой отложений представлял собой полужидкую суспензию, а

прозрачность воды составляла 30–40 см, что существенно затрудняло подводную ориентацию. Отбор кернов на трех других станциях проводился с помощью гравитационной трубки из полихлорвинила. В связи с малой глубиной (1.3–1.5 м) трубка не могла с достаточной скоростью войти в грунт, поэтому не заглуб-

лялась более чем на 0.5 м. Этого было достаточно для определения физико-химических характеристик в слое 30–40 см, что примерно соответствует 3–5 вековой давности, когда практически отсутствовало антропогенное влияние.

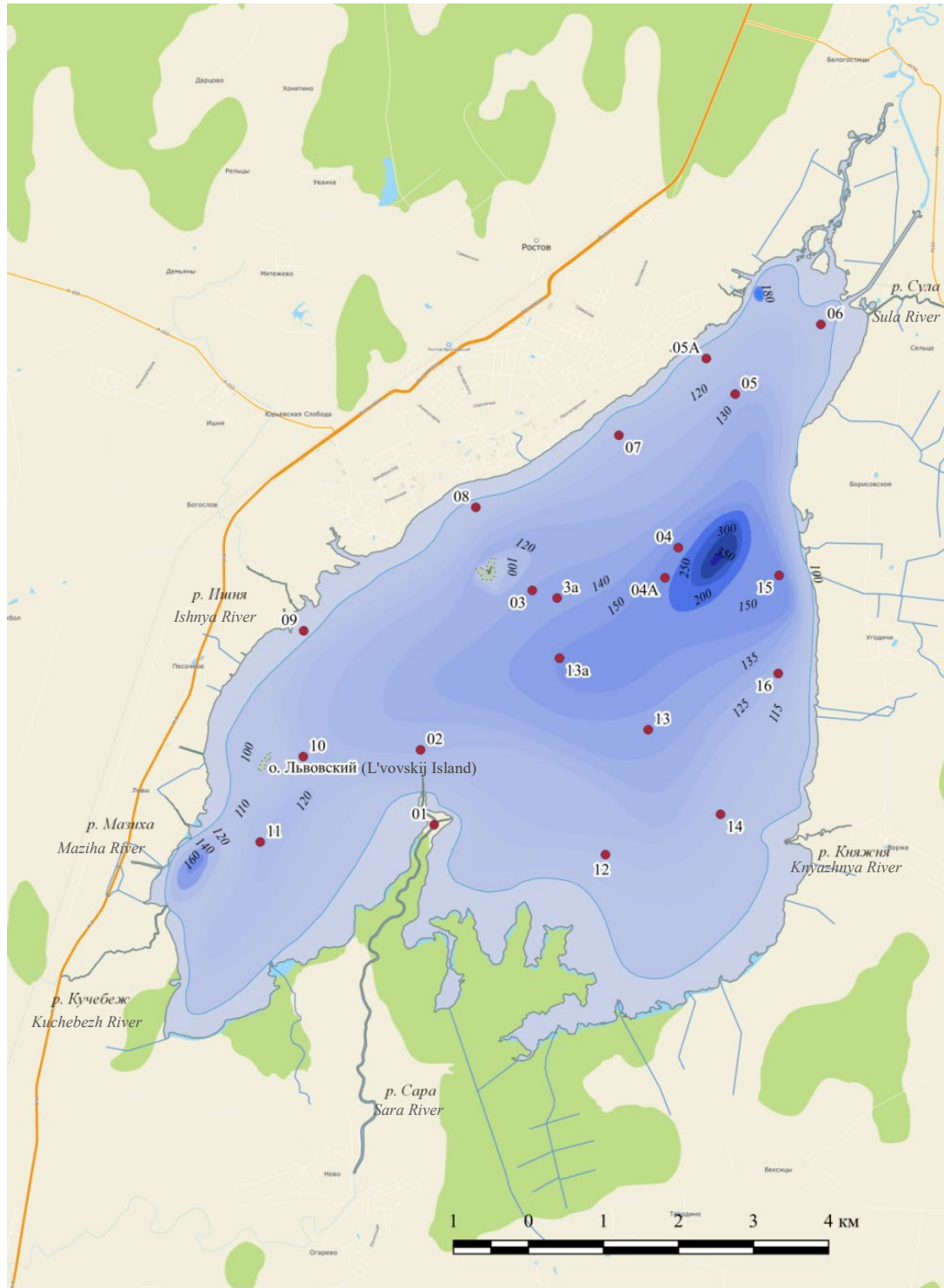


Рис. 1. Схема стандартных станций оз. Неро.

Fig. 1. Scheme of standard stations in Lake Nero.



Рис. 2. Подъем керна, ст. 04.

Fig. 2. Lifting the core, st. 04.

Гранулометрический состав определялся мокрым просеиванием сырых образцов на ситах из нержавеющей высококачественной стали с помощью электромагнитной лабораторной просеивающей установки “Analysette-3” фирмы Alfred Fritsch & CO (Германия) без какого-либо механического воздействия, кроме гидравлических процессов, имитирующих проточность в столбе воды без разрушения агрегированности природных частиц. После проведенного анализа фракции сапропеля смывались с сит, высушивались на водяной бане, взвешивались. Затем определялось процентное соотношение сухого остатка, и рассчитывался средний диаметр частиц пробы по формуле:

$$d_{\text{ср.}} = \frac{ak_1 + bk_2 + ck_3 + \dots + nk_n}{100} \quad (1)$$

где, а, в, с ... n – количество частиц в %, k – коэффициенты средней размерности:

$k_1 > 1_{\text{мм}} = 1$; $k_2 \text{ } 1.0\text{--}0.5_{\text{мм}} = 0.75$; $k_3 \text{ } 0.5\text{--}0.2_{\text{мм}} = 0.35$; $k_4 \text{ } 0.2\text{--}0.1_{\text{мм}} = 0.15$; $k_5 \text{ } 0.1\text{--}0.05_{\text{мм}} = 0.075$; $k_6 \text{ } 0.05\text{--}0.01_{\text{мм}} = 0.03$; $k_7 < 0.01_{\text{мм}} = 0.01$.

Объемная масса (влажная и сухая, г/см³) и естественная влажность (%) донных осадков определялись по единым методикам, апробированным на водохранилищах Верхней Волги [Буторин и др., 1975 (Bytorin et al., 1975)]. Органическое вещество (ОВ) – методом определения потери при прокаливании (ППП) в муфельной печи при температуре 600°C [Аринушкина, 1970 (Arinushkina, 1970)]. Общий углерод рассчитан по формуле $C_{\text{общ.}} = 0.65 \text{ ППП}$ [Законнов и др., 2019 (Zakonnov et al., 2019)]. Химический анализ сапропеля оз. Неро (биогенные элементы – N, P, % сухого веса и тяжелые металлы Ni, Cu, Zn, Pb, Hg, Cd мкг/г) выполнен в специализированной лаборатории Института озераведения РАН [Сигарева и др., 2019 (Sigareva et al., 2019)].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Главными источниками поступления взвешенных и растворенных химических веществ в озеро являются внешний – аллохтонный: абиотический – детритно-минеральный речной и межприточный поверхностный сток с площади водосбора, в том числе антропогенный и внутриводоемный – автохтонный: биотический – связанный с продуцированием высшей водной растительности и многочисленных гидробионтов, составляющих органическую компоненту.

Зольность сапропеля составляет от 50 до 89%. Соответственно, доля органического вещества – в среднем около 30% (11.4–47.5%). По классификации донных отложений равнин-

ных водохранилищ они относятся к органоминеральным – высокопродуктивным [Законнов, 2014 (Zakonnov, 2014)]. По цвету и консистенции образцы проб из поверхностных горизонтов и кернов в сыром виде ничем не отличались. Цвет серый, глинистый, однородный, как по площади дна, так и по толщине колонки. Высушенные пробы открытой акватории были более светлые (блеклые), чем под ассоциациями макрофитов. По физико-химическим показателям они практически не отличались. Блеклость сапропеля объясняется образованием в воде озера белой извести и выпадением ее в осадок в результате интенсивного процесса

биотической декальцинации в период чистой воды [Баранов, 1961 (Baranov, 1961)].

В зарослях высшей водной растительности (ВВР) сапропель в сухом виде оказалась темным с оттенками – черным, серовато-бурым и коричневым, что связано с более активными восстановительными процессами, вызванными дефицитом кислорода и слабой проточностью [Законнов, 2008 (Zakonnov, 2008)]. Основную площадь озера занимает серый (блеклый) сапропель, под ассоциациями высшей водной растительности – более темный (рис. 3). Прибрежная полоса от уреза до 0.5 м глубины сложена каменисто-песчаными наносами и размытой материнской породой, а местами с макрофитными сплавины из остатков камыша, тростника и рогоза.

В настоящее время р. Сара в пределах акватории озера течет в виде канала, сформированного в массе вынесенных ранее собственных наносов. По обеим сторонам глубокой дельты формируются отложения из отмерших макрофитов, сросшихся с дном. Здесь наблюдается образование болотных ландшафтов с типичными для них растениями – осока, двукосточник, ивовая поросль. Рельеф дна водоема ровный. Более 50% акватории приходится на участки с глубинами ~1.5 м [Бикбулатов и др., 2003 (Bikbulatov et al., 2003)]. Имеются две ложбины, одна в северо-восточной части озера с максимальной глубиной 4.4 м и площадью 28 га, другая в устье р. Кучебеж (h ~2 м), которые являются зимовальными ямами (рис. 1).

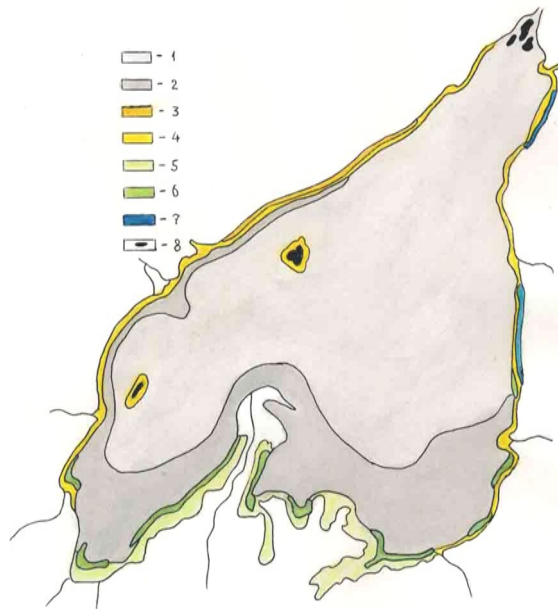


Рис. 3. Схема распределения донных отложений оз. Неро. 1 – светло-серый сапропель, 2 – темно-серый сапропель, 3–4 – каменисто-песчаные наносы, 5 – болотно-луговые почвы, 6 – макрофитные сплавины, 7 – размытая материнская порода, 8 – острова.

Fig. 3. Distribution of bottom sediments of Lake Nero. 1– light- gray sapropel, 2 – dark-gray sapropel, 3–4 – stony-sand sediments, 5 – swamp meadow soils, 6 – macrophytes alloes, 7 – fuzzy mother breed, 8 – islands.

Гранулометрический состав – важнейший показатель состояния донного субстрата, как объект влияния на него внешних (гидродинамических) факторов [Поздняков, 2012 (Pozdnyakov, 2012)], а также внутренних – биохимических, как среды обитания гидробионтов, в том числе и микроорганизмов. Увеличение количества бактерий по фракциям гранулометрического состава было зафиксировано в илистых отложениях Рыбинского водохранилища [Романенко, Законнов, 1990 (Romanenko, Zakonnov, 1990)]. Процесс жизнедеятельности микроорганизмов и бентоса является связующим звеном и в прямом смыс-

ле бионасосом в процессе захвата или поглощения взвешенных и растворенных, в том числе, загрязняющих веществ, их трансформации (увеличение агрегированности или комковатости) и транспортировки (в виде контейнеров – пеллет) на дно. Этот процесс подробно описан для морских вод, как модель маргинального фильтра, который имеет место и в пресноводных экосистемах [Лисицын, 1994 (Lisitsyn, 1994); Гордеев, 2012 (Gordeev, 2012)].

Механический состав поверхностного слоя сапропеля (0–10 см) характеризуется двумя пиками для фракций 0.2–0.1 и 0.05–0.01 мм (n = 21) (табл. 1). Эти пики сохрани-

лись и на горизонте 30–40 см ($n = 7$), а для горизонта 60–70 см ($n = 4$) они также четко прослеживаются, сместившись к более крупной фракции 0.5–0.2 мм. В поверхностном слое 0–10 см количество тонких фракций алеврита и пелита (<0.1 мм) в сумме увеличилось на 53%

по сравнению с нижележащими горизонтами (33–31%), что свидетельствует о снижении транспортирующей способности водных масс, когда гидрологический режим озера был зарегулирован плотиной на р. Векса (реконструирована в 1988 г.).

Таблица 1. Характеристики гранулометрического состава сапропеля по горизонтам, %

Table 1. The characteristics of granulometric composition of sapropel by horizons, %

Горизонт, см Horizon, cm	Гранулометрический состав, мм Granulometric composition, mm							d_{cp}
	>1.0	1.0–0.5	0.5–0.2	0.2–0.1	0.1–0.05	0.05–0.01	<0.01	
0–10	2.3	2.3	15.6	27.1	10.4	25.3	17.0	0.15
30–40	1.0	8.2	28.3	29.3	5.9	17.0	10.4	0.23
60–70	1.4	10.0	29.3	28.5	6.8	15.3	8.8	0.25

Известно, что гидродинамические процессы – ветровые волны, стоковые и ветровые течения способствуют трансформации и перераспределению типов донных осадков. В результате наибольшего гидродинамического воздействия формируется основной гранулометрический скелет осадков, состоящий из крупных фрагментов. В периоды слабой динамической активности водной массы озера структура скелета на-

сыщается более мелкими алеврито-пелитовыми частицами. Анализ гранулометрического состава донных отложений (ДО) на каждой из 21 станции выявил постепенное увеличение среднего диаметра частиц ДО по толщине керна от 0.15 мм в слое 0–10 см до 0.25 мм на горизонте 60–70 см (табл. 1). Концентрации органического вещества (по ППП) были практически неизменны (табл. 2).

Таблица 2. Содержание органического вещества по фракциям гранулометрического состава. а – светлый сапропель, б – темный сапропель

Table 2. The content of organic matter (OM) in fractions of granulometric composition. а – light sapropel, б – dark sapropel

Горизонт, см Horizon, cm	Гранулометрический состав, мм Granulometric composition, mm							ОВ, % OM, %
	>1.0	1.0–0.5	0.5–0.2	0.2–0.1	0.1–0.05	0.05–0.01	<0.01	
0–10 (а)	58.9	31.0	35.4	28.2	14.9	20.8	21.5	30.1
0–10 (б)	60.7	29.8	28.1	29.2	25.3	23.5	26.0	31.8
30–40	46.7	33.0	31.0	32.9	28.3	29.2	25.5	32.9
60–70	49.9	39.2	40.1	41.7	31.8	33.9	29.8	38.1

При значительном количестве макрофитной продукции – по данным 1989 и 2004 гг. соответственно 10.5 и 18.8 тыс. т в год, она, как и ранее, продолжает доминировать в экосистеме озера. Усиление позиций тростника, урути и роголистника свидетельствует об активизации болотообразовательного процесса, который особенно ярко проявляется в его южной и восточной частях [Состояние экосистемы..., 2008 (Sostoyanie ekosistemy..., 2008)].

Согласно имеющимся данным, в поверхностном слое сапропеля светлого и темного оттенков содержание органического вещества, биогенных элементов и тяжелых металлов практически не различается. По результатам мониторинга за период 1963–2017 гг. их количество находится в пределах ошибки анализа (табл. 3, 4).

Такая же картина наблюдается по азоту, фосфору и тяжелым металлам, но с четким

увеличением их концентраций в поверхностном горизонте, особенно на станциях, находящиеся в зоне устьевых участков рек и в прибрежье г. Ростова. Повышенный фон концентраций химических элементов объясняется диффузным промышленным, сельскохозяйственным и бытовым стоками с поверхности водосбора. Иногда концентрации некоторых металлов превышают таковые, характерные для подзолистых почв бассейна, что свидетельствует об антропогенном происхождении, особенно по свинцу, меди, ртути и кадмию [Законнов, 2008 (Zakonnov, 2008)]. Содержание тяжелых металлов за ряд лет не выходит за пределы фоновых значений и, как правило, ниже зарубежных экологических нормативов для донных осадков пресных вод [Проект..., 1996 (Proyekt..., 1996)].

Таблица 3. Содержание органического вещества и биогенных элементов, % сухого веса**Table 3.** Organic matter and nutrients content, % dry weight

Годы Years	Зольность Sonation	ОВ OM	С _{общ} TC	N _{общ} TN	P _{общ} TP
2017*	50–89	11–50	5.0–20.0	0.85–1.36	0.24–1.81
1989–2005**	40–78	22–60	9.5–27.0	0.15–1.50	0.20–1.51
1963–1965***	57–85	15–43	6.5–20.0	0.18–1.70	0.25–2.30

Примечание. “*” – [Sigareva et al., 2019]; “**” [Законнов, 2008]; “***” [Фортунатов, Московский, 1970].

Note. “*” – [Sigareva et al., 2019]; “**” [Zakonnov, 2008]; “***” [Fortunatov, Moskovskiy, 1970].

Таблица 4. Содержание тяжелых металлов (ТМ), мкг/г сухого веса**Table 4.** Concentrations of heavy metals (HM), µg/g of dry weight

ТМ HM	2017 г.	1989 г.	1965 г.	Подзолистые почвы* Podzolicsoils*	Природный фон** Natural back- ground**	Экологические нормативы*** Environmental regulations***
Ni	20.7 (3.8–36.8)	7–30	20–78	0.4–1.3	68	35
Cu	40.9(21.5–54.9)	3–20	28–47	0.2–0.8	90	35
Zn	64.3 (36.7–104.7)	7–69	–	1.0–5.0	95	140
Pb	26.0 (10.4–43.7)	6–21	14–24	0.1–0.5	20	85
Hg	0.30 (0.09–0.78)	0.02–0.12	–	–	–	0.3
Cd	0.44 (0.32–0.67)	0.8–1.4	–	0.02–0.30	0.3	0.8

Примечание. 2017 – современные данные; 1989 – [Гапеева и др., 1995]; 1965 – [Фортунатов, Московский, 1970] “*” – [Гапеева и др., 1995]; “**” – [Nötle, 1988]; “***” – Голландия [Проект..., 1996]; “–” – отсутствие данных.

Note. 2017 – current data; 1989 – [Gapeeva et al., 1995]; 1965 – [Fortunatov, Moskovskiy, 1970]; “*” – Gapeeva et al., 1995; “**” – Holland [Proyekt..., 1996]; “–” – lack of data.

Антропогенное загрязнение обычно оценивают по увеличению снизу–вверх содержания металлов (Pb, Cd, Hg и Zn) по колонке керна. В оз. Неро эта закономерность не прослеживается ни по одному из химических элементов. Данное явление типично для мелководных озер и водохранилищ [Буторин и др., 1975 (Butorin et al., 1975)]. Поэтому верхний слой сапропеля взмучивается, перемещается и переотлагается на дне. Это, возможно, приводит к уменьшению негативного результирующего эффекта от антропогенного воздействия на экосистему озера за счет разбавления промышленно-бытовых и сельскохозяйственных стоков более чистыми нижележащими горизонтами, и последующему выносу взвесей и растворенных веществ за пределы озера. Подтверждением сказанного служит матрица гидро-физико-химических показателей сапропеля на всех контрольных станциях, где практически отсутствуют значимые коэффициенты корреляции (табл. 5).

Более ранними исследованиями показано, что скорость осадконакопления в озере составляет 1–1.5 мм в год [Состояние экосистемы..., 2008 (Sostoyanie ekosistemy..., 2008)]. Таким образом, слой керна 30–40 см мог

сформироваться 300–400, а слой 60–70 см – соответственно – 600–800 лет назад. В связи с этим правомерен вопрос, какой из гидродинамических процессов мог вносить наибольший вклад в формирование гранулометрического состава ДО в прошлом? Предваряя анализ вклада отдельных гидродинамических факторов необходимо сформулировать основные гидрометеорологические и гидробиологические допущения:

Сток в озеро с водосбора, преобладающая скорость и направление ветра в прошлом соответствовали современным характеристикам.

1. Заращение озера высшей водной растительностью происходило линейно от полного отсутствия ВВР в начале Нашей эры (2000 лет назад) до 15.8 км² в настоящее время [наст. сборник]. Глубины озера в то время могли составлять от 5 до 10 м [Эдельштейн, 2014 (Edelstein, 2014)]. Площадь зарастания озера 300–700 лет назад могла достигать 7–9 км².

2. Гидродинамические расчеты проводились для всей акватории озера за исключением его южной части площадью 8 км².

3. Согласно литературным данным, взмучивание и перемещение частиц

ДО диаметром 0.25–0.3 мм (эрозия дна) происходит при максимальных донных скоростях в волновых потоках > 15 см/с [СНиП, 2012 (SNiP, 2012)]. При этом средние по вертикали критические размывающие скорости течения составляют > 20 см/с [Добровольская, 1988 (Dobrovolskaya, 1988)].

Параметры ветровых волн (высота, длина, период, максимальная донная волновая скорость рассчитывались по методике Н.А. Лабзовского). Скорости стоковых и ветровых течений вычислялись по стационарной модели однородного водоема. Указанные методики вошли составной частью в программный комплекс, разработанный для моделирования гидродинамических процессов в озерах и водохранилищах [Поддубный, Сухова, 2002 (Poddubnyi, Sukhova, 2002)]. При моделировании озеро аппроксимировалось квадратной сеточной областью с горизонтальным шагом 225 м. Формировались две матрицы глубин: одна с глубинами, увеличенными на 30 см относительно современного состояния, вторая – с глубинами на 70 см больше. Проведенные расчеты характеристик указанных выше гидродинамических процессов выявили следующие особенности их проявления в оз. Неро.

Стоковые течения. В наибольшей степени стоковые течения могут проявляться в период весеннего половодья. Главным их механизмом служит сток р. Сары. Половодье по р. Саре проходит в период с 6 апреля по 12 мая. Максимальный расход в среднем приходится на 18–20 апреля. Причем следует учитывать, что полное очищение озера ото льда также приходится на 20-е числа апреля [Бикбулатов и др., 2003 (Bikbulatov et al., 2003); Булыгина и др., 2019 (Bulygina et al., 2019)]. Таким образом, пик половодья может проходить при наличии ледостава, в этом случае за счет трения о лед и дно скорости стокового течения значительно уменьшаются. Кроме того, проведенные расчеты стоковых течений с использованием модели однородного водоема при максимально возможном расходе по р. Саре 0.1% обеспеченности ($96 \text{ м}^3/\text{с}$) и при допущении открытой воды показали крайне малые скорости стоковых течений в пределах всей акватории озера – от 1 до 3 см/с и всего лишь в нескольких точках – от 8 до 27 см/с. Проведенный анализ позволил сделать вывод об отсутствии вклада стоковых течений в формирование гранулометрического состава ДО как в прошлом, так и в настоящее время.

Ветровые течения. Ветровые течения моделировались для случая преобладающих в безледный период штормовых ветров

(15 м/с) северного и южного направлений. Вычисления показали, что средние по вертикали скорости переноса воды, приводящие к эрозии дна, составляют 23–40 см/с для обоих случаев увеличенных глубин и отмечаются на мелководье у наветренного берега озера (станции 07 и 15, рис. 1). На остальной акватории водоема интегральные скорости ветровых течений меньше 20 см/с (табл. 6).

Ветровое волнение. Основным механизмом эрозии и трансформации донных отложений в мелководной зоне водоемов выступают максимальные донные скорости в волновых потоках. В силу мелководности оз. Неро при штормовых ветрах при любом варианте измененных глубин водоема высота волн в глубоководной зоне не превышает 80–90 см, на мелководье – 50–60 см. Максимальные донные скорости в зависимости от глубины места и величины разгона волн изменяются в широких пределах: от 6 до 45 см/с. Донные скорости, приводящие к эрозии дна (>15 см/с) проявляются на всех исследуемых станциях озера. Причем в наветренных частях водоема (станции 07 и 15) максимальные донные скорости и средние по вертикали скорости ветрового течения сравнимы по величине (табл. 6).

Проведенный анализ позволяет предположить, что основную роль в трансформации и формировании структуры донных отложений озера в прошлом играли ветровое волнение повсеместно и ветровое течение в наветренных мелководных участках водоема.

Следует отметить, что ранее [Законнов, 2017 (Zakonnov, 2017), Законнов и др., 2018 (Zakonnov et al., 2018)] была предложена формула расчета скорости потока воды (V) по среднему диаметру частиц (d_{cp}):

$$V = 2.09 d_{cp}^{1.07}, (R^2=0.93, \text{ при } n=124) \quad (2)$$

По этой формуле для каждой станции по слоям кернов (0–10, 30–40 и 60–70 см) рассчитывалась возможная скорость потока воды в озере в прошлом. При этом, вычисленные скорости оказались достаточно высокими: от 26 до 51 см/с.

Наилучшее соответствие скоростей потока, рассчитанных по формуле 2, максимальных донных скоростей в волнах и средних по вертикали скоростей ветрового течения было достигнуто на станциях 07, 12 и 15, расположенных в зависимости от направления действия ветра в наветренной части озера (табл. 6).

Таблица 5. Корреляционная матрица гидро-физико-химических характеристик сапропеля оз. Неро

Table 5. Correlation matrix of hydro-physico-chemical characteristics of the sapropel of Lake Nero

Переменная Variable	St	H	M	EV	l	0.75	0.35	0.15	0.075	0.03	0.01	D	V	OV	N	P	Ni	Cu	Zn	Pb	Hg	Cd
St	1.00	-0.49	-0.26	0.27	0.64	-0.21	-0.32	0.35	0.03	0.04	-0.18	0.00	0.00	0.05	0.28	0.07	-0.21	0.10	0.26	0.22	-0.28	0.31
H	-0.49	1.00	0.26	-0.24	-0.35	0.23	0.65	0.03	-0.24	-0.42	-0.15	0.35	0.36	-0.01	-0.00	0.20	0.43	-0.25	-0.45	-0.37	0.12	-0.44
M	-0.26	0.26	1.00	-1.00	-0.01	0.19	0.24	-0.11	0.37	-0.23	-0.16	0.22	0.22	-0.53	-0.69	0.44	-0.09	-0.26	0.01	-0.30	0.05	-0.40
EV	0.27	-0.24	-1.00	1.00	0.02	-0.19	-0.24	0.13	-0.37	0.22	0.14	-0.21	-0.21	0.57	0.72	-0.43	0.08	0.27	0.03	0.32	-0.06	0.41
l	0.64	-0.35	-0.01	0.02	1.00	-0.14	-0.12	0.14	0.30	-0.07	-0.32	0.24	0.24	0.07	0.07	0.00	-0.19	0.05	0.28	0.02	-0.25	0.25
0.75	-0.21	0.23	0.19	-0.19	-0.14	1.00	0.59	0.04	-0.41	-0.38	-0.58	0.78	0.79	0.30	0.07	-0.31	0.01	0.13	0.00	-0.15	-0.43	-0.38
0.35	-0.32	0.65	0.24	-0.24	-0.12	0.59	1.00	0.02	-0.24	-0.65	-0.54	0.82	0.82	0.11	0.10	-0.22	0.26	0.07	-0.13	-0.21	-0.39	-0.37
0.15	0.35	0.03	-0.11	0.13	0.14	0.04	0.02	1.00	-0.32	-0.60	-0.29	0.28	0.26	0.27	0.34	0.20	0.15	-0.10	0.06	0.04	-0.28	0.06
0.075	0.03	-0.24	0.37	-0.37	0.30	-0.41	-0.24	-0.32	1.00	0.09	0.17	-0.27	-0.28	-0.45	-0.37	0.42	-0.38	0.05	0.20	-0.01	0.11	0.17
0.03	0.04	-0.42	-0.23	0.22	-0.07	-0.38	-0.65	-0.60	0.09	1.00	0.32	-0.70	-0.69	-0.08	-0.15	-0.12	-0.21	0.10	0.17	0.28	0.40	0.32
0.01	-0.18	-0.15	-0.16	0.14	-0.32	-0.58	-0.54	-0.29	0.17	0.32	1.00	-0.78	-0.77	-0.33	-0.20	0.16	0.05	-0.24	-0.38	-0.12	0.57	-0.03
D	0.00	0.35	0.22	-0.21	0.24	0.78	0.82	0.28	-0.27	-0.70	-0.78	1.00	1.00	0.28	0.18	-0.22	0.11	0.10	0.06	-0.18	-0.59	-0.27
V	0.00	0.36	0.22	-0.21	0.24	0.79	0.82	0.26	-0.28	-0.69	-0.77	1.00	1.00	0.28	0.18	-0.23	0.10	0.11	0.06	-0.18	-0.60	-0.28
OV	0.05	-0.01	-0.53	0.57	0.07	0.30	0.11	0.27	-0.45	-0.08	-0.33	0.28	0.28	1.00	0.76	-0.25	0.02	0.26	0.28	0.31	-0.16	0.32
N	0.28	-0.00	-0.69	0.72	0.07	0.07	0.10	0.34	-0.37	-0.15	-0.20	0.18	0.18	0.76	1.00	-0.23	0.16	0.39	0.31	0.43	-0.23	0.44
P	0.07	0.20	0.44	-0.43	0.00	-0.31	-0.22	0.20	0.42	-0.12	0.16	-0.22	-0.23	-0.25	-0.23	1.00	-0.10	-0.32	-0.07	-0.15	0.35	-0.10
Ni	-0.21	0.43	-0.09	0.08	-0.19	0.01	0.26	0.15	-0.38	-0.21	0.05	0.11	0.10	0.02	0.16	-0.10	1.00	-0.24	-0.33	-0.15	0.07	-0.15
Cu	0.10	-0.25	-0.26	0.27	0.05	0.13	0.07	-0.10	0.05	0.10	-0.24	0.10	0.11	0.26	0.39	-0.32	-0.24	1.00	0.66	0.67	-0.35	0.48
Zn	0.26	-0.45	0.01	0.03	0.28	0.00	-0.13	0.06	0.20	0.17	-0.38	0.06	0.06	0.28	0.31	-0.07	-0.33	0.66	1.00	0.79	-0.10	0.66
Pb	0.22	-0.37	-0.30	0.32	0.02	-0.15	-0.21	0.04	-0.01	0.28	-0.12	-0.18	-0.18	0.31	0.43	-0.15	-0.15	0.67	0.79	1.00	0.09	0.71
Hg	-0.28	0.12	0.05	-0.06	-0.25	-0.43	-0.39	-0.28	0.11	0.40	0.57	-0.59	-0.60	-0.16	-0.23	0.35	0.07	-0.35	-0.10	0.09	1.00	0.01
Cd	0.31	-0.44	-0.40	0.41	0.25	-0.38	-0.37	0.06	0.17	0.32	-0.03	-0.27	-0.28	0.32	0.44	-0.10	-0.15	0.48	0.66	0.71	0.01	1.00

Примечание. St – горизонт (0–10 см); H – глубина, в т.ч. с учетом горизонта отбора проб в ядрах, м; M – объемная масса сухого осадка, г/см³; EV – естественная влажность, %; K >1- <0.01 – коэффициенты средней размерности гранулометрического состава сапропеля, мм; D – средний диаметр частиц, мм; V – расчетная средняя скорость течения, м/с; OV – содержание органического вещества, %; N, P – азот, фосфор, %; Ni, Cu, Zn, Pb, Hg, Cd – тяжелые металлы, мкг/г сухого веса. Жирным шрифтом отмечены значимые коэффициенты корреляции.

Note. St – Horizon (0–10 cm); H – depth, including the horizon where core samples were taken, m; M – volumetric mass of dry sediment, g/cm³; EV – water content of natural sediment, %; K >1- <0.01 – coefficients of mean size of sapropel in granulometric fractions, mm; D – average diameter of particles, mm; V – estimated average flow rate, m/s; OV – organic matter content, %; N, P – nitrogen, phosphorus, %; Ni, Cu, Zn, Pb, Hg, Cd – heavy metals, µg/g of dry weight. Significant coefficients of correlation are given in bold.

Таблица 6. Максимальная донная скорость в волновых потоках (V_d) и средняя по вертикали скорость ветрового течения (V_{cp}) в оз. Неро при различных метеорологических условиях**Table 6.** The maximum bottom velocity in wave flows (V_b) and the vertical average wind current velocity (V_{av}) in Lake Nero under various weather conditions

№ станции, № Station	Горизонт, см Horizon, cm	d_{cp} , мм	V_d , см/с		V_{cp} , см/с	$V_{(2)}$	Относит. ошибка, %, Relative error, %
			Ветер 15 м/с / Wind 15 m/s				
			360–45 ⁰	225–180 ⁰	360 и 180 ⁰		
02	30–40	0.27	19–25	16	–	51	>30
04	30–40	0.24	–	16	–	45	>30
	60–70	0.29	–	–	–	56	>30
05	30–40	0.22	–	22–29	–	41	>30
	60–70	0.25	–	18–24	–	47	>30
07	30–40	0.18	22	22–45	23	33	27
	60–70	0.23	16	16–35	23	43	23
10	30–40	0.24	31	–	–	45	>30
12	30–40	0.19	17–32	–	–	35	9
15	30–40	0.16	–	37–43	40	29	22
	60–70	0.21	–	27–33	40	39	18; 3

Примечание. $V_{(2)}$ – скорость потока, рассчитанная по формуле 2. Жирным шрифтом выделены наилучшие совпадения скоростей, рассчитанных разными методами. “–” – отсутствие данных.

Note. $V_{(2)}$ is the flow rate calculated by the formula 2. The best matches of the speeds calculated by different methods are marked in bold. “–” – lack of data.

Таким образом, формула 2 применительно к оз. Неро может повсеместно адекватно воспроизводить максимальные донные скорости в волновых потоках, а среднюю по вертикали скорость ветрового течения только на ограниченных наветренных участках водоема.

Следует отметить, что несмотря на продолжающееся эвтрофирование озера, ему свойственна повышенная гидродинамическая активность, постоянно поддерживающая состояние вторичного загрязнения, посредством взмучивания донных осадков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процессы трансседиментации (переотложения) на каждой станции индивидуальны и вносят большое разнообразие в распределение химических элементов. Так, распределение ТМ связано с их тесным взаимодействием с гранулометрическим составом как с крупнозернистыми – остатками растительности, так и с тонкодисперсными – глинистыми частицами из-за их сорбционных способностей. Седиментированный материал представляет собой “пирог” с сильно перемешанными слоями. В результате гидродинамической активности антропогенное влияние, которое должно быть больше в последнее десятилетие, нейтрализуется более чистыми нижележащими слоями сапропеля. Далее под действием ветровых течений поллютанты распространяются по всему озеру, разбавляются и сбрасываются по рекам Векса и Которосль в Волгу. Высокая зарастаемость озера (~15 км² при площади водоема 57.8 км²) способствует частичному перехвату растениями загрязнений, поступающих с водосбора, и служит естественным барьером на пути их распространения, что несомненно сказывается на самоочищении озера.

В настоящее время озеро в связи с отсутствием регулирования стока р. Вексы и

участившимися случаями прорыва канализации г. Ростова, отсутствием накопителей ливневого стока с территории города и автомагистрали, находится на стадии деградации.

Реабилитация озера возможна в результате реализации комплекса оздоровительных мероприятий, включающих:

- проведение рекультивации приустьевых валов и чистки русел малых рек для свободного стока в озеро;

- обновление и совершенствование канализации г. Ростова, обеспечение перехвата и утилизации ливневых стоков;

- предотвращение антропогенных стоков из небольших населенных пунктов и автомагистрали Москва – Ярославль;

- благоустройство и охрана окружающей среды в г. Ростове и вокруг озера;

- внедрение наилучших доступных технологий сельскохозяйственного производства на водосборе, обеспечивающих снижение биогенной нагрузки на озеро;

- выработку оптимального режима регулирования стока через плотину на р. Векса в интересах реабилитации экосистемы озера.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность д.г.н. С.А. Поддубному за ценные советы и консультации при подготовке работы, а также ведущему инженеру-программисту Е.В.Чаморовской за проведение необходимых расчетов гидродинамических характеристик оз. Неро.

Работа выполнена в рамках государственного задания № АААА-А18-118012690104-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 487 с.
- Баранов И.В. Лимнологические типы озер СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1961. 275 с.
- Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М., Литвинов А.С., Поддубный С. А. Гидрология и гидрохимия озера Неро. Рыбинск: Издательство ОАО “Рыбинский Дом печати”, 2003. 192 с.
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадкой на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТР). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942 / ВНИИГМИ-МЦД, Обнинск, 2019. URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature,precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения: 17.10.2019).
- Буторин Н.В., Зиминова Н.А., Курдин В.П. Донные отложения верхневолжских водохранилищ. Л.: Наука, 1975. 160 с.
- Гапеева М.В., Довбня И.В., Законнов В.В., Широкова М.А. Эмпирические связи между содержанием металлов в растениях и донных осадках эвтрофного озера Неро // Экология. 1995. № 3. С. 217–221.
- Гордеев В.В. Геохимия системы река – море. М.: И.П. Матушкина И.И., 2012. 452 с.
- Добровольская З.Н. Гидродинамическая модель процесса переноса взвешенных веществ в стратифицированных эстуариях // Математическое моделирование динамики вод в речных бассейнах, больших озерах и морских заливах. М.: Вычислительный центр АН СССР, 1988. С.110–113.
- Законнов В.В. Характеристика донных отложений // Состояние экосистемы озера Неро в начале XXI века. М.: Наука, 2008. С. 61–70.
- Законнов В.В. Генетическая классификация грунтового комплекса равнинных водохранилищ // Комплексные исследования водохранилищ. Межв. сб. научн. тр. Перм. гос. ун-та. Пермь, 2014. С. 23–30.
- Законнов В.В. Течения и их роль в формировании наносов // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т.1.: Гидро- и геодинамические процессы. Управление водными ресурсами. Перм. гос. ун-т. Пермь, 2017. С. 65–68.
- Законнов В.В., Законнова А.В., Цветков А.И., Шерышева Н.Г. Гидродинамические процессы и их роль в формировании донных осадков водохранилищ Волжско-Камского каскада // Труды Института биологии внутренних вод РАН. 2018. Вып. 81 (84). С. 35–46.
- Законнов В.В., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р., Законнова А.В., Маланин В.В., Марасов А.А. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 6. Донные отложения Куйбышевского водохранилища и их картирование с использованием геоинформационных технологий // Водное хозяйство России. 2019. № 2. С. 72–89.
- Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 35, № 5. С. 735–747.
- Поддубный С.А., Сухова Э.В. Моделирование влияния гидродинамических и антропогенных факторов на распределение гидробионтов в водохранилищах (руководство для пользователей). Рыбинск: Издательство ОАО “Рыбинский дом печати”, 2002. 120 с.
- Поздняков Ш.Р. Проблемы расчета и измерения характеристик наносов в водных объектах. С.-Петербург: Лема, 2012. 226 с.
- Проект “Волга” в Череповце. Н. Новгород: Экологический центр “Дронт”, 1996. 23 с.
- Романенко В.И., Законнов В.В. Общее количество бактерий в донных отложениях Рыбинского водохранилища на частицах разного размера // Биология внутренних вод: Информ.бюл. 1990. № 87. Л.: Наука. С. 9–13.
- Состояние экосистемы озера Неро в начале XXI века. М.: Наука, 2008. 408 с.
- Строительные нормы и правила. Нагрузка и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). СНиП 2.06.04-82. М.: ООО “Аналитик”, 2012. 112 с.
- Фортунатов М.А., Московский Б.Д. Озера Ярославской области: кадастровое описание и краткие лимнологические характеристики // Озера Ярославской области и перспективы их хозяйственного использования. Ярославль. Яросл. гос. ун-т; Яросл. отд. геогр. о-ва СССР, 1970. С. 3–183.
- Эдельштейн К.К. Гидрология озер и водохранилищ. М.: Издательство “Перо”. 2014. 399 с.
- Nötle J. Pollution source analysis of river water and sewage // Environ. Technol. Lett. 1988. Vol. 9. P. 857–868.
- Sigareva L.E., Timofeeva N.A., Zakonnov V.V., Rusanov A.G., Ignatyeva N.V., and Pozdnyakov Sh.R. Features of Natural Eutrophication of Shallow Lake Nero Based on Sedimentary Pigments // Inland Water Biology. 2019. T. 12. Suppl 2. P. 33–41. DOI: 10.1134/S1995082919060129.

REFERENCES

- Arinushkina E.V. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* [Chemical Soil Analysis Guide]. M.: MGU, 1970, 487 p. (In Russian).

- Baranov I.V. *Limnologicheskie tipy ozer SSSR* [Limnological types of lakes of the USSR]. L.: Gidrometeoizdat, 1961, 275 p. (In Russian).
- Bikbulatov E.S., Bikbulatova E.M., Litvinov S.A., Poddubniy S.A. *Gidrologiya i gidrokhimiya osera Nero* [Hydrology and hydrochemistry of Lake Nero]. Rybinsk: Izdatel'stvo OAO "Rybinskiy dom pečati", 2003, 192 p. (In Russian).
- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M. *Opisanie massiva dannykh sutochnoy temperatury vozdukha i kolichestva osadkov na meteorologicheskikh stantsiyakh Rossii i byvshego SSSR (TTTR)* [Description of the data set of daily air temperature and the amount of precipitation at meteorological stations in Russia and the former USSR (TTTR)]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2014620942 / VNIIGMI-MTSD. Obninsk, 2019. URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature, precipitation#opisaniye-massiva-dannykh> (data obrashcheniya: 17.10.2019). (In Russian).
- Butorin N.V., Ziminova N.A., Kurdin V.P. *Donnye otlozheniya verkhnevolzhskikh vodokhranilishch* [Bottom Sediments in the Upper Volga Reservoirs]. L.: Nauka, 1975, 160 p. (In Russian).
- Dobrovolskaya Z.N. *Gidrodinamicheskaya model' protsessa perenosa vzheshennykh veshchestv v stratifitsirovannykh estuariyakh* [Hydrodynamic model of the process of transport of suspended solids in stratified estuaries]. *Matematicheskoye modelirovaniye dinamiki vod v rechnykh basseynakh, bol'shikh ozerakh i morskikh zalivakh*. M.: Vychislitel'nyi tsentr AN SSSR, 1988, pp. 110–113. (In Russian).
- Fortunatov M.A., Moskovskiy B.D. *Ozera Yaroslavskoy oblasti: kadaastrovoe opisanie i kratkie limnologicheskie kharakteristiki*. [Lakes of the Yaroslavl region: cadastral description and brief limnological characteristics] // *Ozera Yaroslavskoy oblasti i pespektivy ikh khozyaystvennogo ispol'zovaniya*. Yaroslavl: Yaroslavskiy gos. un-t, 1970, p. 3–83. (In Russian).
- Gapeeva M.V., Dovbnya I.V., Zakonnov V.V., Shirokova M.A. *Empericheskie svyazi mezhdru sodержaniem metallov v rasteniyakh i donnykh osadkakh evtrofnogo osera Nero* [Empirical relationships between the metal content in plants and bottom sediments of the eutrophic Lake Nero]. *Ekologiya*, 1995, no. 3, pp. 217–221. (In Russian).
- Gordeev V.V. *Geokhimiya sistemy reka-more* [Geochemistry of the river-sea system]. M.: I.P. Matushkina I. I., 2012, 452 p. (In Russian).
- Lisitsyn A.P. *Marginalnyi fil'tr okeanov* [Marginal Ocean Filter]. *Okeanologiya*, 1994, Bd. 35, no. 5, pp. 735–747.
- Nötle J. *Pollution source analysis of river water and sewage*. *Envior.Technol. Lett*, 1988, vol. 9, pp. 857–868.
- Poddubniy S.A., Sukhova E.V. *Modelirovaniye vliyaniya gidrodinamicheskikh i antropogennykh faktorov na raspredeleniye gidrobiontov v vodokhranilishchakh (rukovodstvo dlya pol'zovateley)* [Modeling the influence of hydrodynamic and anthropogenic factors on the distribution of aquatic organisms in reservoirs]. Rybinsk: Izd-vo OAO "Rybinskiy dom pečati", 2002, 120 p. (In Russian).
- Pozdnyakov Sh.P. *Problemy rascheta i izmereniya kharakteristik nanosov v vodnykh ob'ektakh* [Problems of calculation and measurement of sediment characteristics in water bodies]. S.-Peterburg: Lema, 2012, 226 p. (In Russian).
- Proyekt "Volga" v Cherepovtse. 1996*. [Project "Volga" in Cherepovets]. N.Novgorod: Ekologicheskij centr "Dront", 23 p. (In Russian).
- Romanenko V.I., Zakonnov V.V. *Obshcheye kolichestvo bakteriy v donnykh otlozheniyakh Rybinskogo vodokhranilishcha na chasimtsakh raznogo razmera* [The total number of bacteria in the bottom sediments of the Rybinsk reservoir on particles of different sizes]. *Biologiya vnutrennikh vod: Inform.byul*. L.: Nauka, 1990, no. 87, pp. 9–13. (In Russian).
- Sigareva L.E., Timofeeva N.A., Zakonnov V.V., Rusanov A.G., Ignatyeva N.V., and Pozdnyakov Sh.R. *Features of Natural Eutrophication of Shallow Lake Nero Based on Sedimentary Pigments*. *Inland Water Biology*, 2019, no. 12, suppl 2, pp. 33–41. DOI: 10.1134/S1995082919060129. (In Russian).
- Sostoyaniye ekosistemy ozera Nero v nachale XXI veka*. [The state of the ecosystem of Lake Nero at the beginning of the XXI century]. M.: Nauka, 2008. 408 p. (In Russian).
- Stroitel'nyye normy i pravila. Nagruzka i vozdeystviya na gidrotekhnicheskiye sooruzheniya (volnovye, ledovye i ot sudov)* [Building regulations. Load and impact on hydraulic structures (wave, ice and from ships)] SNiP 2.06.04-82. M.: OOO "Analitik", 2012, 112 p. (In Russian).
- Zakonnov V.V. *Geneticheskaya klassifikatsiya gruntovogo kompleksa ravninnykh vodokhranilishch* [Genetic classification of the Soil complex of lowland Reservoirs]. *Kompleksnyye issledovaniya vodokhranilishch*. Mezhd. sb. nauch. tr. Perm. gos. un-ta. Perm., 2014, pp. 23–30. (In Russian).
- Zakonnov V.V. *Kharakteristika donnykh otlozheniy. Sostoyaniye ekosistemy ozera Nero v nachale XXI veka* [Characteristics of bottom sediments. The state of the ecosystem of Lake Nero at the beginning of the XXI century]. M.: Nauka, 2008, pp. 61–70. (In Russian).
- Zakonnov V.V. *Techniya i ikh rol' v formirovaniye nanosov* [Currents and their Role Information of Sediments]. *So-vremennyye problemy vodokhranilishch i ikh vodosborov. T.1: Gidro- i geodinamicheskiye protsessy. Upravleniye vodnymi resursami*. Perm. gos. un-t, 2017, pp. 65–68. (In Russian).
- Zakonnov V.V., Chuiko G.M. *Problemy krupnykh melkovodnykh ozer gumidnoy zony evropeyskoy territoriy Rossii*. [Problems of Large Shallow Lakes in the Gumid Zone of European Russia]. *Ozera Evrazii: Problemy i puni ikh resheniya. Materialy II Mezhdunarodnoy konferencii (14–19 maya 2019 g.)*. Kazan': Izd. Akademiy nauk RT. 2019, pp. 80–84.
- Zakonnov V.V., Ivanov D.V., Khasanov R.R., Zakonnova A.V., Malanin V.V., Marasov A.A. *Prostransvenno-vremennaya transformatsiya gruntovogo kompleksa vodokhranilishch Volgi. Soobscheniye 6. Donnye otlozheniya Kuybyshevskogo vodokhranilishcha i ikh kartirovaniye s ispol'sovaniem geoinformatsionnykh tekhnologiy* [Spatial-

temporal Transformation of the Volga Reservoirs' Soil Complex. Communication 6. The Kuybyshev Reservoir Bottom Sediments and their Mapping with the Use of Geoinformation Techniques]. *Water Sector of Russia*, 2019, no. 2, pp. 72–89. (In Russian).

Zakonnov V.V., Zakonnova A.V., Tsvetkov A.I., Sherysheva N.G. Gidroginamichskiye protsessy i ikh rol' v formirovaniyi donnykh osadkov vodokhranilishch Volzhsko-Kamskogo kaskada [Hydro-dynamic processes and their role in formation of the Volga-Kama reservoir cascade bottom sediments]. *Transactions of Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS*, 2018, no. 81 (84), pp. 35–46. (In Russian). doi: 10.24411/0320-3557-2018-1-0004.

THE EVOLUTIONARY DEVELOPMENT AND CURRENT STATE OF LAKE NERO ACCORDING TO SAPROPEL ANALYSIS

V. V. Zakonnov¹, Sh. R. Pozdnyakov², S. A. Kondratiev², N. V. Ignatieva²,
A. I. Tsvetkov¹, A. V. Zakonnova¹

¹*Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences,
Borok, Nekouzski raion, Yaroslavl oblast, 152742, Russia, zak@ibiw.ru*

²*Institute of Lake Research, Russian Academy of Sciences,
196105, ul. Sevastyanova 9, Saint Petersburg, Russia e-mail: tbgmaster@mail.ru*

The paper presents the characteristics of sapropel based on the results of analysis of samples collected at 21 stations in Lake Nero. Its current state is assessed based on hydrophysical and hydrochemical parameters. A layer-by-layer (0–10, 30–40 and 60–70 cm) granulometric composition of stratigraphic cores made it possible to compare the evolutionary development of the lake corresponding to the periods 100, 300–400 and 600–800 years ago. It is found that natural hydrodynamic processes (wind-driven waves and wind-driven currents) cause erosion and mixing of the surface (0–10 cm) polluted sapropel layer with clean underlying horizons and carry pollutants absorbed on suspended particles outside the lake. The approach used made it possible to identify the ways of a shallow lake ecosystem formation and outline promising directions.

Keywords: lake ecosystem, bottom sediments – sapropel, hydrophysical and hydrochemical parameters, retrospective assessment