



УДК 556.5

**ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДОННЫХ ОСАДКОВ
НА СОРБЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ НА ПРИМЕРЕ ВОДОЕМОВ
ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ**

**THE INFLUENCE OF PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF SEDIMENTS
ON THE SORPTION CAPACITY ON THE EXAMPLE OF RESERVOIRS
OF THE LENINGRAD REGION**

**О.И. Венедиктова, О.Г. Роговая, И.Ю. Тихомирова
O.I. Venediktova, O.G. Rogovaya, I.U. Tikhomirova**

Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,
Россия, 191186, г. Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48

Herzen State Pedagogical University of Russia, 48 Seafront of the Moika River,
Saint-Petersburg, 191186, Russia

E-mail: olga513@list.ru; olgarogovaya@mail; itikhomirova55@mail.ru

Аннотация

Проведены исследования верхнего (0–5 см) слоя донных отложений трех озер Ленинградской области. Изучены гранулометрический состав, плотность твердой фазы, содержание органических веществ, железа, марганца, фосфора. Рассмотрены сорбционные свойства донных отложений с различными физико-химическими параметрами, оценены емкость монослоя адсорбированной воды, предельный сорбционный объем, удельная площадь поверхности, возможные механизмы сорбции железа, марганца и фосфора. Показано, что эти характеристики являются информативными в аспекте активности биоты водоема. Активный ил может быть отнесен к наиболее интересному типу донных отложений, и обнаружение его в центральной части озера Гусиное свидетельствует о большом потенциале к сопротивлению антропогенной нагрузке, особенно в отношении загрязнения органическими соединениями.

Abstract

Studies of the upper (0–5 cm) layer of bottom sediments of three lakes of the Leningrad Region were carried out. The granulometric composition, the density of the solid phase, the content of organic substances, iron, manganese and phosphorus have been studied. Sorption properties of bottom sediments with various physicochemical parameters, the capacity of a monolayer of adsorbed water, the limiting sorption volume, the specific surface area, the possible mechanisms of sorption of iron, manganese and phosphorus are considered. It has been shown that these characteristics are informative in the aspect of the activity of the biota of the reservoir. Active silt can be referred to the most interesting type of the bottom sediments and its detection in the central part of Lake Gusinoe indicates a great potential for resisting anthropogenic load, especially with regard to contamination by organic compounds.

Ключевые слова: водоемы, донные осадки, сорбционная способность.

Keywords: reservoirs, bottom sediments, sorption capacity.

Введение

Небольшие водоемы естественного и искусственного происхождения имеют важное экологическое значение, они регулируют влажность воздуха и уровень грунтовых вод, выполняют рекреационные функции для животных и местных жителей. В последнее время им уделяется все больше внимания со стороны исследователей, создан экологический атлас озер Карелии [Филатова, Кухарева, 2013].



Показано, что из-за своих гидрологических и морфологических особенностей малые водоемы наиболее чувствительны к возрастанию антропогенной нагрузки и ускорению эвтрофирования. Экологические исследования водоемов часто сопровождаются изучением физико-химических свойств донных отложений, так как их физико-химические свойства и запасенные пищевые ресурсы существенно влияют на жизнедеятельность бентосных организмов – неотъемлемую часть аквальных экосистем. В процессе антропогенного эвтрофирования водоемов меняются структура, пористость, гигроскопическая влажность осадков, в них начинают преобладать процессы десорбции ранее аккумулярованных веществ, включая токсичные. Физико-химические свойства характеризуют стабильность донных осадков относительно смыва течением и аккумуляции взвешенных частиц: размеры частиц, плотность их прилегания. Количество, состав и доступность органического вещества не только определяют пищевые ресурсы донных отложений, но и позволяют прогнозировать сорбционно-десорбционные процессы с участием металлов. Из литературных данных хорошо известно, что для высокодисперсных осадков характерно не только повышенное содержание органических веществ, но и концентрирование микроэлементов, таких как железо и марганец, однако механизмы сорбции металлов донными отложениями трактуются неоднозначно [Романов и др., 2007].

Результаты и их обсуждение

В данном исследовании были изучены пробы донных отложений трех озер Ленинградской области, расположенных во Всеволожском (озера Сювеярви и Мадалаярви) и Приозерском (озеро Гусиное) районах. Исследуемые озера расположены на одной широте и являются сравнимыми как по происхождению (ледниковые), так и по экологическому состоянию. Сювеярви и Мадалаярви связаны между собой небольшой протокой в одну водную систему. Данные о численности населения, проживающего на берегах этих озер (озера Сювеярви и Мадалаярви – 40 тыс. чел., озеро Гусиное – 8 тыс. чел.), позволяют предположить, что на них оказывается антропогенное воздействие: на озера Сювеярви и Мадалаярви – значительное, на озеро Гусиное – в меньшей степени.

Точки пробоотбора выбраны, исходя из гидрологического режима водоемов: 1 – берег оз. Сювеярви, 2 – середина оз. Сювеярви, 3 – берег оз. Мадалаярви, 4 – середина оз. Мадалаярви (пробы отобраны в июне 2012 г.); 5, 7, 9 – берег оз. Гусиное; 6, 8, 10 – 200 м от береговой линии оз. Гусиное (пробы отобраны в июне 2013 г.). Проба № 8 идентифицирована как активный ил.

Пробоподготовка донных отложений состояла в центрифугировании в течение 10 мин. (15 тыс. об./мин.) и доведении проб до постоянной массы в термостате при температуре 105 °С. Определяли гранулометрический состав, плотность твердой фазы, потери при прокаливании, сорбционную способность по отношению к парам воды, валовое содержание железа, марганца, фосфора. Экспериментальные данные приведены в таблице.

Плотность твердой фазы донных осадков определяли пикнометрическим методом [Моисеева и др., 2008]. Сущность метода состоит в определении объема, занимаемого твердой фазой, соответствующего объему вытесняемой жидкости, в качестве которой нами была использована дистиллированная вода. Плотность почв уменьшается с увеличением в них содержания органических веществ, но плотность донных отложений зависит и от активности донных животных. Они размельчают, перемешивают, частично преобразуют и уплотняют илы, пропуская их через себя в процессе питания. Плотность осадков ($d_{\text{тв}}$ фазы) исследуемых водоемов выше, чем плотность почв (плотность дерново-подзолистых почв, находящихся по берегам водоемов, составляет 1.1–1.2 г/см³) [Марчик, Ефремов, 2006]. Для озера Гусиное

плотность донных осадков почти в 2 раза меньше, чем для озер Сювеярви и Мадалаярви, при этом выявлена дифференциация плотностей осадков береговой линии и середины оз. Мадалаярви. Минимальное значение плотности отмечено для активного ила (проба № 8).

Содержание органических веществ в донных отложениях определяли гравиметрическим методом в соответствии с ГОСТ 27753.10-88 [ГОСТ 27753.10-88]. Сущность метода заключается в прокаливании пробы грунта при температуре 525 °С. Предельное значение суммарной относительной погрешности результатов анализа при доверительной вероятности $P=0.95$ составляет 9%. Донные отложения озер Сювеярви, Мадалаярви и Гусиное вдоль береговой линии содержат меньшее количество органических веществ по сравнению с пробами донных отложений, отобранными в 200 м от берега, что подтверждается величиной потерь при прокаливании при 550 °С (табл.). В целом, содержание органического вещества в осадках оз. Гусиное низкое, за исключением активного ила, где величина ППП_{550 °С} достигает 46.3% и является максимальной для трех озер. Высокое содержание органики в пробах донных отложений оз. Сювеярви может быть связано с деятельностью донной биоты, которая отвечает за баланс синтеза и деструкции биомассы.

Гранулометрический состав, представленный в виде процентного содержания частиц каждой фракции, называется фракционным составом. Фракционный состав водной суспензии донных отложений при исследовании оз. Сювеярви, Мадалаярви, Гусиное определяли ситовым методом (методика Качинского) в соответствии с ГОСТ 12536-79. Взвешивание на аналитических весах производили с погрешностью до 0.0001 г. Результаты вычисления гранулометрического состава донных отложений определяли с погрешностью до 0.1%. Для классификации донных отложений и объяснения сорбционных свойств был изучен фракционный состав донных отложений (рис. 1 и 2), за исключением пробы № 8. Кодировка образцов была дана по классификации Безрукова и Лисицына [Безруков, Лисицын, 1960]. Согласно гранулометрической классификации, осадки относятся к песчаному и алевритовому типу. Несмотря на то, что тип грунтов определяют крупные фракции песка, сравнительный анализ фракций с размером частиц менее 0.01 мм подтверждает разные условия седиментогенеза в водоемах. Выделение содержания пеллитовой фракции в отдельную характеристику донных осадков обусловлено тем, что именно частицы менее 0.01 мм обладают максимальной сорбционной способностью [Венедиктова и др., 2015].

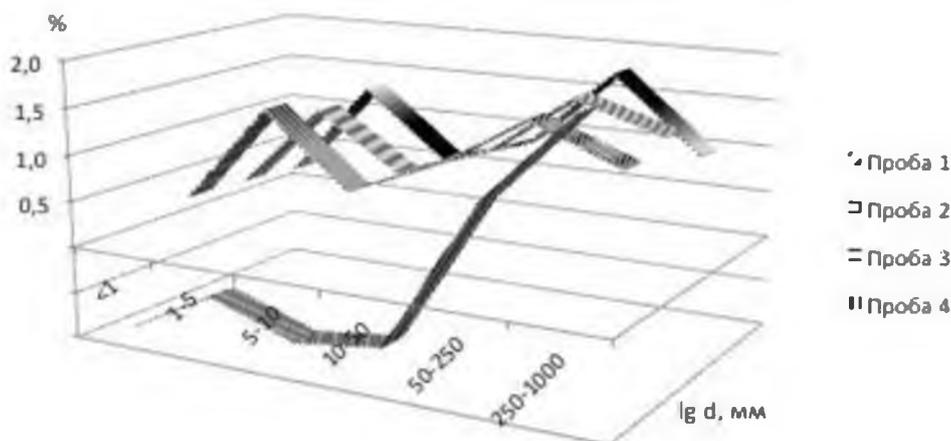


Рис. 1. Гранулометрический состав проб донных отложений озер Сювеярви и Мадалаярви
Fig. 1. Granulometric composition of samples of bottom sediments of the lakes of Suvejarvi and Madalayarvi

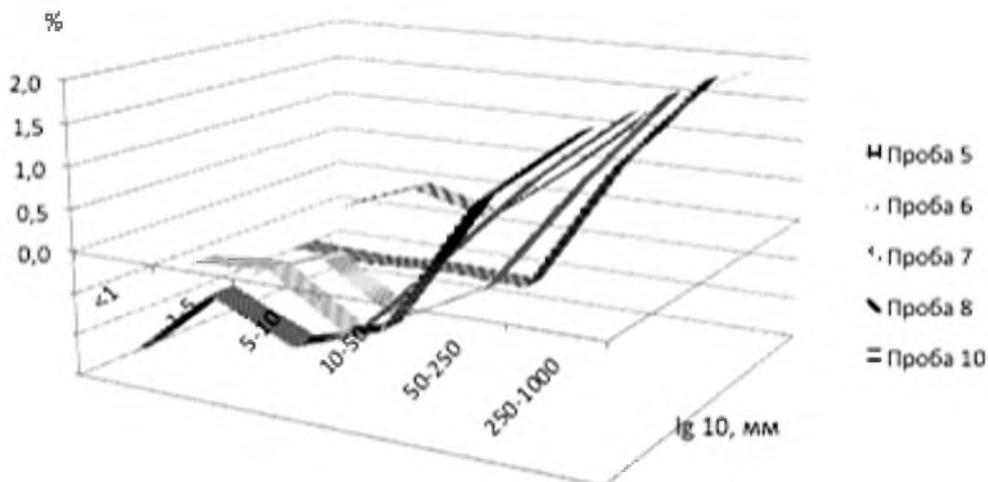


Рис. 2. Гранулометрический состав проб донных отложений озера Гусиное
 Fig. 2. Granulometric composition of sediment samples of the lake Gusinoe

Изучение процессов сорбции и десорбции в донных отложениях важно при рассмотрении процессов накопления загрязнителей и самоочищения в водных экосистемах. Сорбционная активность донных отложений по отношению к парам воды характеризует их способность удерживать воду. Анализ совокупности данных о фракционном составе, содержании органических веществ и сорбционной активности по отношению к парам воды позволяет оценить аккумуляционный потенциал донных отложений по отношению ко многим микроэлементам. Данные о максимальной сорбции, валовом содержании железа, марганца и фосфора в твердой фазе донных отложений представлены в таблице.

Определение валового содержания *Mn*, *Fe*, *P* в донных осадках проводили в соответствии со стандартной методикой [ПНД Ф 16.1.42-04]. Анализ образцов осуществляли с использованием спектрометра СПЕКТРОСКАН МАКС-GV. После квартования просеянный через сито размером 0.25 мм образец донных отложений дополнительно измельчали до размерности пудры на лабораторном дисковом стирателе ЛДИ-65 и затем на лабораторном прессе проводили таблетирование подготовленных проб. Контролировалась чистота реактивов, и проводился холостой опыт.

Валовое содержание соединений железа, марганца и фосфора в донных отложениях исследуемых озер дифференцировано, осадки береговой линии накапливают меньше этих элементов. Обогащение донных осадков марганцем связано почти исключительно с биотическим фактором, как и в случае накопления железа в водоемах с маложелезистой водой. Донные отложения из середины озера Сювеярви оказались обогащены марганцем. Пониженное содержание марганца в донных осадках озера Мадалаярви, вероятно, связано с тем, что процессы синтеза и деструкции биомассы сбалансированы и экосистема озера, в целом, более устойчива, чем в озере Сювеярви. Коэффициент концентрации, индекс антропогенной нагрузки PLI и коэффициент загрязнения Хокансона также показали меньшие значения. Однако железа запасено в этом озере больше, чем в озере Сювеярви. Осадки озера Гусиное по индексам загрязнения относятся к «наиболее благополучной зоне».

Активный ил представляет собой комочки и хлопья светло-серого, желтоватого или коричневого цвета размером 3–150 мкм, поддерживается во взвешенном состоянии



благоприятными гидродинамическими условиями. Он состоит из органических и неорганических веществ и представляет собой амфотерную коллоидную систему, при $pH=4-9$ имеющую отрицательный заряд. Благодаря развитой поверхности, активный ил способен сорбировать загрязнители, содержащие органические вещества, коллоидные и взвешенные частицы, которые поступают в водоем с дождевыми водами, смываются с берегов, а также образуются в процессе развития и отмирания животных и растительных организмов, находящихся в водоеме [Шашкина, Дедков, 2010]. Микроорганизмы активного ила выполняют экологическую функцию, загрязняющие органические и неорганические вещества, адсорбированные на поверхности активного ила, используются микроорганизмами для питания в процессе жизнедеятельности. Например, ароматические и алифатические углеводороды превращаются в безвредные диоксид углерода, воду, нитрит, сульфат-ионы и др. Таким образом, активный ил может выступать в качестве природного сорбента и способствовать процессу самоочищения водоема. Активный ил может быть отнесен к наиболее интересному типу донных отложений, и обнаружение его в центральной части озера Гусиное свидетельствует о большом потенциале к сопротивлению антропогенной нагрузке, особенно в отношении загрязнения органическими соединениями.

Для оценки сорбционных свойств донных отложений трех исследуемых озер была изучена адсорбция паров воды при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ при различных значениях относительной влажности среды с использованием набора эксикаторов и фиксации изотерм адсорбции [Агеев, 2011; Грег, Синг, 1984]. Заданные значения относительной влажности в эксикаторах создавались водными растворами серной кислоты, поскольку зависимости парциальных давлений водяных паров над водными растворами серной кислоты от их концентрации приведены в справочной литературе.

Для получения сопоставимых результатов первоначально образцы высушивали в термостате при $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ до постоянной массы. Далее сухие образцы помещали в эксикаторы с различной влажностью. Техника измерений мало отличалась от стандартной: образцы через определенные промежутки времени извлекали из эксикаторов и взвешивали на аналитических весах с точностью 0.1 мг до достижения образцами постоянной массы. Процесс поглощения паров воды образцами считали законченным, когда два последовательных взвешивания давали расхождение в массах, не превышающее 0.2 мг . Процесс сорбции продолжался до установления сорбционного равновесия: во-первых, на всех интервалах сорбции время пребывания образца в состоянии сорбционного равновесия в 2-3 раза превышало время его достижения; во-вторых, все измерения проходили в изобарно-изотермических условиях при температуре $20\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и атмосферном давлении $740\pm 10\text{ мм рт. ст.}$ В таблице представлены значения емкости монослоя (a_m), предельного сорбционного объема (V_m) и площади удельной поверхности ($S_{уд}$). На рисунках 3-5 представлены изотермы адсорбции-десорбции донных отложений в области относительных давлений $p/p_s=0\div 1$. Точка перегиба на изотерме адсорбции соответствует завершению образования монослоя (точка B). Изотермы всех проб донных отложений имеют S -образную форму и относятся по классификации С. Брунауэра, Л. Деминга, У. Деминга и Э. Теллера (БДТ) ко II типу [Адамова, Сафронов, 2008]. Анализ полученных данных показал, что они разделены на три группы.



Таблица
Table

Физико-химические свойства донных отложений озер Сювеярви, Мадалаярви, Гусиное
Physico-chemical properties of the bottom sediments lakes Suvejarvi, Madalajarvi, Gusinoye

Места пробоотбора	№ точек отбора проб	ППП ₅₃₀ OC, %	$d_{гв\text{ фвал}}$, г/см ³	Типы грунтов и их коды [Безруков, Лисицын, 1960]	$a_m(p/p_s=0.02)$, ммоль/Г _{до}	$V_m(p/p_s=1)$, ммоль/Г _{до}	$S_{уд}$, м ² /Г _{до}	$Fe_{ввл}$, г/кг _{до}	$Mn_{ввл}$, мг/кг _{до}	$P_{ввл}$, мг/кг _{до}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Сювеярви	1	5.6±0.7	2.37±0.01	Песок мелкий, Пм	0.12	4.11±0.05	330	17.1±1.1	600±40	1200±20
	2	17.5±2.3	2.47±0.01	Песок средний, Пс	0.36	7.81±0.06	980	64.7±4.1	2700±190	7800±100
Мадалаярви	3	4.8±0.6	2.41±0.01	Песок средний, Пс	0.03	1.00±0.03	80	12.6±0.8	300±20	200±10
	4	5.5±0.7	2.03±0.01	Песок средний, Пс	0.34	9.82±0.06	920	30.1±1.9	500±40	2400±30
Гусиное	5	0.3±0.1	1.12±0.01	Алеврит крупный, Ак	0.16	2.35±0.03	440	8.9±0.6	300±20	400±10
	6	2.5±0.3	1.16±0.01	Песок крупный, Пк	0.21	1.80±0.02	570	38.2±2.5	1100±80	2000±30
Гусиное	7	0.5±0.1	1.16±0.01	Песок крупный, Пк	0.06	0.40±0.01	170	8.9±0.6	600±40	300±10
	8	46.3±6.0	1.03±0.01	Активный ил	0.70	13.06±0.07	1900	36.7±2.3	1400±100	1100±10
	9	1.0±0.1	1.16±0.01	Песок крупный, Пк	0.06	0.33±0.01	170	7.7±0.5	500±40	300±10
	10	5.6±0.7	1.13±0.01	Песок крупный с примесью среднего, Пк, Пс	0.24	4.00±0.05	650	43.6±2.8	1400±100	1800±20

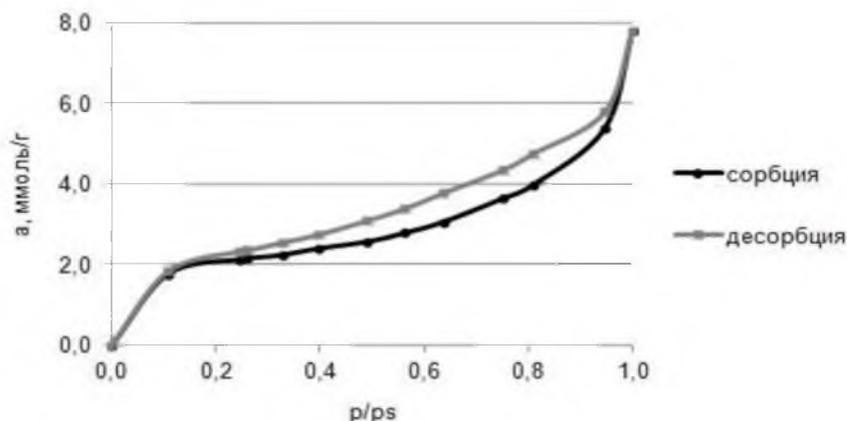


Рис. 3. Изотермы адсорбции паров воды при 20 °С донными отложениями середины озера Сювеярви (проба № 2)

Fig. 3. Isotherms of adsorption of water vapor at 20 °C by bottom sediments of the lake's middle Syuvejarvi (sample № 2)

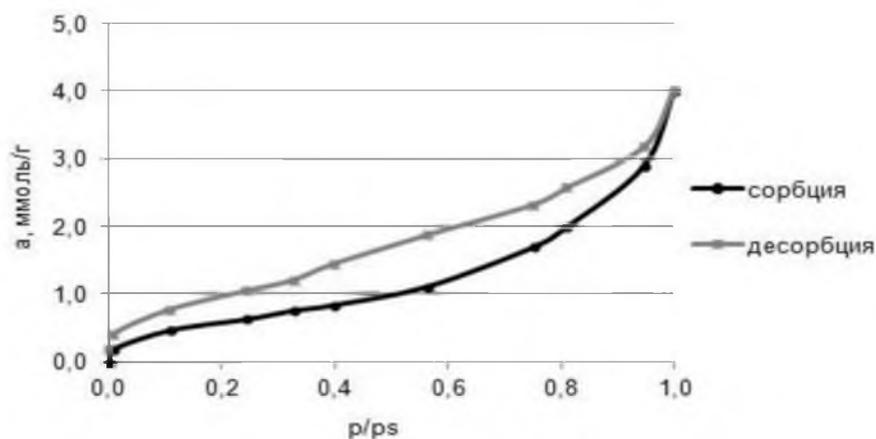


Рис. 4. Изотермы адсорбции паров воды при 20 °С донными отложениями, отобранными у берега озера Гусиное (проба № 10)

Fig. 4. Isotherms of adsorption of water vapor at 20 °C by bottom sediments, taken off the shore of the lake Gusinoe (sample № 10)

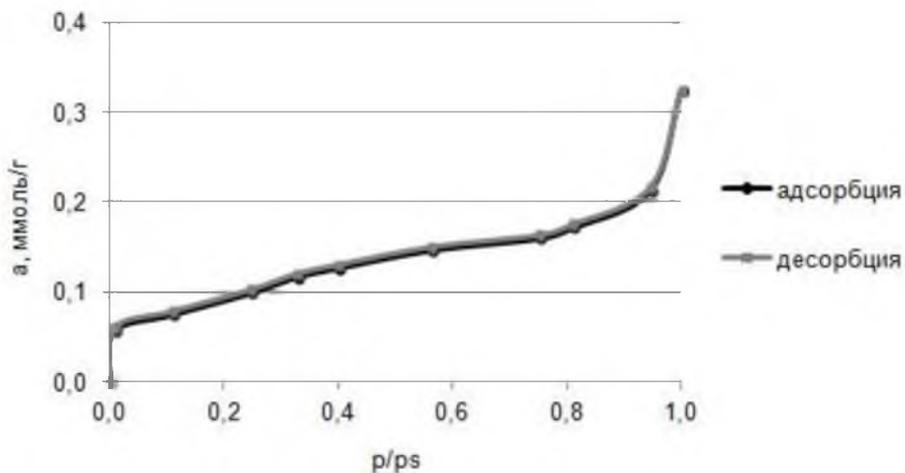


Рис. 5. Изотермы адсорбции паров воды при 20 °С донными отложениями, отобранными у берега озера Гусиное (проба № 9)

Fig. 5. Isotherms of adsorption of water vapor at 20 °C by bottom sediments, selected near the shore of the lake Gusinoe (sample № 9)



К первой группе изотерм адсорбции донными отложениями могут быть отнесены изотермы проб № 2, 8, отобранных с середины озер. Характерной особенностью изотерм данной группы является то, что они выпуклы по отношению к оси абсцисс (см. рис. 3). Рассчитанная величина удельной поверхности по воде составила $980 \text{ м}^2/\text{г}$. В адсорбционно-десорбционном цикле зафиксирован обратимый гистерезис, что свидетельствует о наличии капиллярной конденсации в мезопорах.

Изотермы адсорбции второй группы характеризуют пробы № 4, 6, 10. На изотерах данной группы в области низких давлений наблюдается крутой подъем, который свидетельствует о наличии микропор в адсорбенте (см. рис. 4). График линейен в области изотермы, включающей точку *B*, расчет удельной поверхности методом БЭТ позволяет оценить ее как $650 \text{ м}^2/\text{г}$. Наблюдается необратимый гистерезис, простирающийся на всю область относительных давлений. Причиной адсорбционного гистерезиса в области низких давлений является «активированное проникновение» молекул воды в поры. Таким образом, при адсорбции паров воды имеет место как физическая, так и хемосорбция.

Третья группа изотерм адсорбции характерна для проб № 1, 3, 5, 7, 9, относящихся к береговой зоне и отличающихся наименьшей сорбционной способностью по отношению к парам воды. Характерной особенностью изотерм данной группы является то, что в области низких относительных давлений наблюдается крутой подъем изотермы, что свидетельствует о наличии микропор в исследуемом образце, как и в случае изотерм второй группы (см. рис. 5). Однако, в отличие от изотерм II группы, изотерма адсорбции III группы полностью обратима во всей области относительных давлений. Отсутствие адсорбционного гистерезиса свидетельствует о физической адсорбции воды донными осадками. Величина удельной поверхности составила $170 \text{ м}^2/\text{г}$.

Изучение процессов сорбции и десорбции для донных отложений важно при рассмотрении процессов самоочищения в водных экосистемах, так как данные процессы определяют возможность снижения токсичности поступающих в водотоки загрязнителей.

Выводы

В результате проведенного исследования охарактеризованы донные отложения трех озер Ленинградской области. Все исследуемые осадки обводненные, сравнимы между собой и являются репрезентативными для водоемов в целом. Донные осадки озер Сюевярви и Мадалаярви более плотные, чем осадки озера Гусиное, при этом выявлена дифференциация плотностей осадков береговой линии и середины озера Мадалаярви.

Гранулометрический анализ выявил доминирование частиц размером более 0.05 мм . Так, для проб № 2, 4, 3 преобладающим является размер фракции $50\text{--}250 \text{ мкм}$; для проб № 1, 6, 7, 9, 10 – $250\text{--}1000 \text{ мкм}$ и только для пробы № 5 – $10\text{--}50 \text{ мкм}$. Согласно гранулометрической классификации, донные осадки всех исследуемых озер можно отнести к песчаному, алевритовому типу и активному илу.

Данные гранулометрического анализа коррелируют с содержанием органических веществ, большое содержание в пробах донных отложений пеллитовой фракции также подтверждается соответствующими большими потерями при прокаливании. Донные отложения озер Сюевярви, Мадалаярви и Гусиное вдоль береговой линии обогащены органическими веществами по сравнению с пробами донных отложений, отобранными в 200 м от берега. В целом, содержание органического вещества в осадках оз. Гусиное низкое.

Исследованные осадки разделены на три группы: I группа – № 2, 8; II группа – № 4, 6, 10; III группа – № 1, 3, 5, 7, 9. Максимальные сорбционные свойства отмечены в III группе. Наблюдается положительная корреляция сорбционной способности не только с содержанием органики, но и с запасенными железом, марганцем и фосфором.

Для активного ила выявлены минимальное значение плотности твердой фазы и максимальное значение $\text{ППП}_{550} \text{ }^\circ\text{C}$ по отношению ко всем исследованным пробам. Ранее было показано, что вода оз. Гусиное чище, чем вода оз. Сюевярви и Мадалаярви, таким образом, активный ил, идентифицированный в точке № 8, может быть признан существенным фактором биологического самоочищения исследуемого водоема.



Список литературы References

1. Агеев М.А. 2011. Оценка удельной поверхности бумаги адсорбцией. *Химия растительного сырья*, (2): 165–168.
Ageev M.A. 2011. Evaluation of the specific surface of the paper by adsorption. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, (2): 165–168. (in Russian)
2. Адамова Л.В. 2008. Сорбционный метод исследования пористой структуры наноматериалов и удельной поверхности наноразмерных систем. Екатеринбург, 62.
Adamova L.V. 2008. Sorbcionnyj metod issledovanija poristoj struktury nanomaterialov i udel'noj poverhnosti nanorazmernih sistem [Sorption method of research of the porous structure of nanomaterials and the specific surface of nanoscale systems]. Ekaterinburg, 62. (in Russian)
3. Безруков И.Л., Лисицын А.П. 1960. Труды института океанологии АН СССР. Т. 32. Классификация осадков современных морских водоемов. М., 313.
Bezrukov I.L., Lisicyn A.P. 1960. Trudy instituta okeanologii AN SSSR. T. 32. Klassifikacija osadkov sovremennyh morskikh vodoemov [Proceedings of the Institute of Oceanology of the USSR Academy of Sciences. 32. Classification of the sediments of modern marine ponds]. Moscow, 313. (in Russian)
4. Венедиктова О.И. 2015. Эколого-химическое описание озера Гусиное. В кн.: Геология, геоэкология, эволюционная география. Т. 14. СПб.: 46–50.
Venediktova O.I. 2015. Ecological-chemical description lake Gusinove. In: Geologija, geojeologija, jevolucionnaja geografija [Geology, Geoecology, evolutionary geography]. Vol. 14. Saint-Petersburg: 46–50. (in Russian)
5. ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Дата введения 01.07.2015.
GOST 12536-79. Soils. Methods of laboratory determination of granulometric (grain) and micro aggregate composition. Date of introduction 01.07.2015. (in Russian)
6. ГОСТ 27753.10-88. Грунты тепличные. Метод определения органического вещества. Дата введения 01.01.1990.
GOST 27753.10-88. The soils are greenhouse. Method of the determination of organic matter. Date of introduction 01.01.1990. (in Russian)
7. Грег С., Синг К. 1984. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. М., 306.
Greg C., Sing K. 1984. Adsorbcija, udel'naja poverhnost', poristost' [Adsorption, specific surface area, porosity]. Moscow, 306. (in Russian)
8. Марчик Т.П. 2006. Почвоведение с основами растениеводства. URL: http://ebooks.grsu.by/pochva_s_osn_rast/index.htm (29 мая 2017).
Marchik T.P. 2006. Pochvovedenie s osnovami rastenievodstva [Soil science with the basics of crop production]. Available at: http://ebooks.grsu.by/pochva_s_osn_rast/index.htm (accessed 29 may 2017). (in Russian)
9. Моисеева Т.С. 2011. Определение плотности твердой фазы почвы в черноземе обыкновенном. *Фундаментальные исследования*, (11): 174–177.
Moiseeva T.S. 2011. Determination of the density of the solid phase of soil in ordinary chernozem. *Fundamental research*, (11): 174–177.
10. ПНД Ф 16.1.42-04. 2010. «Методика выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв методом рентгенофлуоресцентного анализа».
PND F 16.1.42-04. 2010. "Methods of performing measurements of the mass fraction of metals and metal oxides in powder samples of soils using X-ray fluorescence analysis". (in Russian)
11. Романов А.С. 2007. Влияние физико-химических характеристик донных осадков на распределение микроэлементов на примере бухт Севастополя (Черное море). *Экология моря*, 73: 85–90.
Romanov A.S. 2007. The effect of physico-chemical characteristics of sediments on the distribution of minerals on the example of Sevastopol bays (Black sea). *Ecology of the Sea*, 73: 85–90. (in Russian)
12. Филатова Н.Н. 2013. Справочник. Озера Карелии. Петрозаводск, 464.
Filatova N.N. 2013. Spravochnik. Ozera Karelii [Reference. Lakes of Karelia]. Petrozavodsk, 464. (in Russian)
13. Шашкина П.С. 2010. Оценка сорбционных возможностей речных взвешенных веществ различного генезиса. *Вестник Московского государственного областного университета*, (1): 91–96.
Shashkina P.S. 2010. Evaluation of the sorption capacities of river suspended matter of different Genesis. *Bulletin of Moscow State Regional University*, (1): 91–96. (in Russian)