

УДК 556:551.3.05

СОСТОЯНИЕ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА КАНДРЫ-КУЛЬ (РЕСПУБЛИКА БАШКОРТОСТАН) В 2010 И 2012 ГОДАХ

© 2015 Н.Г. Шерышева, Т.А. Ракина

Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти

Статья поступила в редакцию 30.12.2014

Представлены результаты исследований донных отложений озера Кандры-Куль в 2010, 2012 гг. Выявлены типы илов и особенности их пространственно-временного распределения. Дана характеристика сезонной изменчивости структуры грунтов. Исследованы их водно-физические свойства, химические компоненты и сезонная динамика. Рассмотрены корреляции между свойствами среды и содержанием исследуемых компонентов. Установлены отдельные связи между глубиной, температурой, влажностью, pH среды, окислительно-восстановительным потенциалом и потерями при прокаливании, содержанием общего и минерального фосфора, общего железа, карбонатов. *Ключевые слова:* типы донных отложений, пространственно-временное распространение, водно-физические свойства, химические компоненты, связи

Работа выполнена при финансовой поддержке Природного Парка «Кандры-Куль» (договор № 01/12 от 01.12.2011г. и № 08/12 от 20.12.2011 г.).

Озеро Кандры-Куль расположено в западной части республики Башкортостан в одной из котловин Белебеевской возвышенности и является вторым после Асликуль по площади акватории водоемом республики. В 1965 г. озеро было объявлено памятником природы и в настоящее время имеет научное, природоохранное, хозяйственное, эстетическое и рекреационное значение [17]. Донные отложения в экосистеме озера Кандры-Куль играют важную роль в круговороте и распределении вещества и энергии, а также депонировании химических элементов. В современных условиях высокой антропогенной нагрузки на водоем [10] возрастает вероятность вторичного загрязнения, т.е. поступления химических веществ, в том числе и загрязняющих веществ, из донных отложений в водную толщу.

Донные отложения озера Кандры-Куль изучались в 2007-2010 гг. в рамках комплексных исследований экологического состояния водоема Филиалом ГУ Дирекция по особо охраняемым природным территориям [4] и НИИ безопасности жизнедеятельности [5]. Были выявлены основные типы донных отложений, составлена карта рельефа дна, определены отдельные физико-химические параметры осадков, содержание биогенных элементов, нефтепродуктов и тяжелых металлов. На дне озера в глубоководной части водоема (профундали) обнаружены лечебные грязи – сапропели.

Шерышева Наталья Григорьевна, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории экологии простейших и микроорганизмов.

E-mail: sapfir-sherry@yandex.ru

Ракина Татьяна Анатольевна, инженер лаборатории экологии простейших и микроорганизмов.

В 2010 г. и 2012 г. экспедицией ИЭВБ РАН г. Тольятти проводилось комплексное исследование оз. Кандры-Куль с целью изучения гидрохимического режима и планктонных (бактерио-, фито-, протозоо- и метазоопланктон) и бентосных (бактериобентос) сообществ, и оценки его состояния по гидрохимическим и гидробиологическим данным [7 - 10].

Цель настоящих исследований – дать общую характеристику донных отложений озера, определить физико-химические параметры и выявить связи между ними.

РАЙОН И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование донных отложений проводили в составе комплексной экспедиции Института экологии Волжского бассейна РАН в 2010 г. (июнь, сентябрь) и в 2012 г. (май, июль, сентябрь). Грунтовая съемка осуществлялась на 25 станциях по всей площади водоема и включала зоны профундали (максимальные глубины 14,5-16 м), сублиторали с глубинами 7,7-9 м), открытой литорали (глубина 2-3 м) и литорали с зарослями высшей водной растительности (с глубинами 0,5-2,4 м).

Пробы донных отложений отбирали с поверхностных горизонтов (0-5 см) лотом (объем захвата 100 см³). Активную реакцию среды (pH), окислительно-восстановительный потенциал (Eh) и температуру в осадках измеряли pH-метром и ртутным термометром непосредственно при отборе проб. Для оценки окислительно-восстановительных условий в илах с учетом активной реакции среды (pH) применяли расчетный показатель, выраженный в gN₂ (определяемый как Eh/29 + 2pH) [11]. Согласно [18] анаэробным



- I – темно-серые и черные пелитовые маслянистые илы;
- II – тонкодисперсные серые и черные илы;
- III – серые и черные алевритовые илы с участками мелкопесчаных илов;
- IV – серые и черные песчаные илы и заиленные пески с участками черных тонкодисперсных илов;
- V – мелко- и среднезернистые пески;
- VI – неисследованная зона.

Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб [9] и распределения донных отложений оз. Кандры-Куль:

Пелагические станции: ст. 2, 4, 7 и 14 (с глубинами 8-9 м) и ст. 3 (глубина 14,5-16 м). Станции открытой литорали с глубиной 2-3 м: ст. 1, 5, 6, 8-14, 16 и 17. Дополнительные станции в заросшем мелководье (глубиной 0,5-1,5 м): в зарослях тростника в районе станций 10, 12, 13, 16 и 17. В зарослях тростника с рдестом узколиственным около ст. 13 и с урутью около ст. 16; в зарослях водяной сосенки в районе ст. 11 и 12; в зарослях урути около ст. 10; в зарослях рогоза около ст. 9; в зарослях хары около ст. 13

условиям соответствует интервал $0 < rN_2 > 12-13$, микроаэробным – $12-13 < rN_2 > 18-20$, аэробным – $rN_2 > 20$. В лабораторных условиях определяли влажность грунта ($W, \%$) [1], гранулометрический состав [2, 12]. Идентификацию типов донных отложений проводили по классификации Кленовой М.В. [6] на основе процентного содержания частиц размером $< 0,01$ мм. Определение потери веса при прокаливании, содержания общего и минерального фосфора, суммарных карбонатов ($C_k = CO_2 + HCO_3^- + CO_3^{2-}$), общего железа (лабильные кислотоэкстрагируемые формы) проводили широко применяемыми методами [1, 15, 19, 24].

Микроскопический анализ грунтов проводили на микроскопе BIOLAR при увеличении $\times 100$ или $\times 150$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Типы донных отложений. На основании грунтовых съемок 2010 г. и 2012 г. в озере Кандры-Куль идентифицируются два основных типа донных отложений: пески и илы. Среди песков выявлены средне-, мелкозернистые заиленные пески. Разновидности илов представлены песчанистыми, алевритовыми и тонкодисперсными серыми и черными илами. По данным исследований [5] обнаружены участки мелководья, свободные от растительности, дно которых покрыто песчанисто-галечными и редко щебенисто-галечными (у абразионных берегов) образованиями.

В качестве особенностей донных отложений озера Кандры-Куль можно отметить разнообразие основных типов осадков и неоднородность их пространственного распределения (табл. 1). Так, локально на разных участках водоема обнаружены серые илы, плотно покрытые дрейсенной и условно обозначенные в табл. 1 как «дрейсеновые» (13А, 14А); мелкозернистые пески, обильно

пронизанные осколками ракуши; макрофитные илы (ст. 10, 10А), черный сероводородный ил (ст. 12), газирующие илы с интенсивным (ст. 9) и менее интенсивным (ст. 8) запахом ацетилена, а также илы с гнилостным запахом (ст. 13А, 14, 16), однородный плотный рыже-коричневый мелкозернистый песок (16А).

Тонкодисперсные пелагические серые и черные илы в зависимости от территориального расположения характеризуются изменением соотношений алевритовых и пелитовых фракций. Обращает на себя внимание разнообразие структуры тонких илов: в них присутствуют маслянистые и коллоидные образования, включения оливкового, зеленого, коричневого или рыжего цвета (окисленные гидроксиды железа). На всех пелагических станциях, за исключением самой глубоководной, обнаружены друзы дрейсены.

При микроскопическом исследовании в литоральных осадках, где, как правило, преобладает растительный детрит, в ряде случаев в массе обнаруживаются остатки зоопланктона. Из фрагментов фитопланктона присутствуют в большом количестве створки диатомовых водорослей, цианобактерии. Среди органического вещества животных организмов обнаружены простейшие, кладоцеры, коловратки, фрагменты насекомых.

Распределение донных отложений по площади дна озера. В глубоководной центральной части озера (глубина 14,5 м - 16 м) залегают тонкодисперсные гомогенные темно-серые или серые маслянистые илы (рис. 1). В пелагической зоне с глубинами около 7 - 9 м развиваются тонкодисперсные черные и серые илы.

Мелко- и среднезернистые пески сосредоточены в литорали на северном побережье озера. На северо-западном мелководье с глубиной 1 м в зарослях тростника обнаружен плотный мелкозернистый рыже-коричневый песок.

Серые илы, обогащенные растительным детри-

Таблица 1. Типы и структура донных отложений озера Кандры-Куль в мае-сентябре 2012 г.

Станция, глубина	Биотоп	Тип донных отложений	Структура донных отложений
Южный берег			
1 2,3 м	Открытая литораль. Подводные заросли рдеста; на дне вегетирует роголистник.	<i>Черный блестящий мелкоалевритовый ил.</i>	В июле в верхних слоях ила формируются белесые прослои. Ил содержит остатки макрофитов и зоопланктона; в сентябре увеличивается содержание тонких фракций.
6 3 м	Открытая литораль. На дне - остатки макрофитов, дрейсена.	Темно-серый мелкоалевритовый ил. Содержит много корней макрофитов.	В мае верхний слой ила – темно зеленый, в сентябре формируется рыжий наилок. В микроструктуре преобладает грубый растительный детрит. К осени формируется тонкая пелитовая фракция.
12 2,6 м	Открытая литораль. На дне вегетирует водяная сосенка.	Черный тонкодисперсный ил (<i>сероводородный</i>). В июне регистрируется интенсивный запах <i>сероводорода</i> .	Однородный блестящий ил. В микроструктуре преобладает пелит, тонкий детрит и мелкие растительные остатки.
12А 1,8 м	Заросли водяной сосенки.	Черный тонкодисперсный ил	Маслянистый ил с серо-зеленым рыхлым наилком; образован пелитовыми частицами и тонким обильным растительным детритом.
Восточный берег			
9 1,9 м	Заросли хары, рогоза, нитчатки; в июле – обильное вегетирование пузырчатки; встречаются створки дрейсены.	Темно серый пелитово-алевритовый ил (газирующий ил).	Грунт содержит остатки трубчатых растительных тканей, зоопланктона, беспозвоночных. В микроструктуре преобладает тонкий и грубый растительный детрит. В июле в грунте происходит интенсивное газообразование с запахом <i>ацетилена</i> .
10 2,2 м	Открытая литораль. На дне – заросли урути, пузырчатка, нитчатка; дрейсена	<i>Макрофитный алевритовый ил.</i>	Ил практически состоит из разлагающихся остатков макрофитов. В сентябре увеличивается фракция пелита и тонкого растительного детрита.
10 А 1,5 м	Заросли тростника, сосенки, рдеста роголистника; дрейсена	Темно-серый песчаный ил с <i>остатки макрофитов</i> ; пронизан корнями растений.	Ил жесткий крупинчатый. Осенью формируется черный ил с преобладанием пелитовой фракции. В микроструктуре преобладает растительный детрит.
11 2,4 м	Открытая литораль. На дне – заросли сосенки, ракуша.	Серый алевритово-мелкопесчаный ил с белыми вкраплениями и верхним слоем зеленого цвета.	В сентябре верхний слой – окисленный коричневого цвета; в толще – многочисленные фрагменты растительных тканей. В микроструктуре обнаружен тонкий и грубый растительный детрит.
Северный берег			
5 2,4 м	Открытая литораль. Дно покрыто пузырчаткой.	Темно серый мелкозернистый песок.	Песок содержит растительный детрит, панцирные фрагменты зоопланктона, экземпляры дрейсен; к осени заиливается. В микроструктуре преобладают алевритовые частицы.
5С 2,4 м	Открытая литораль. В районе стока. Много осколков дрейсены.	Серый мелкозернистый песок.	Сверху – окисленный коричневый слой; в песке содержатся растительные и хитиновые фрагменты.
8 2,1 м	Открытая литораль. На дне залегает хара.	Серый глинистый мелкозернистый песок с запахом <i>ацетилена в июле</i> .	Плотный песок с коричневыми прослоями; в сентябре сверху образуется окисленный слой рыже-коричневого цвета; ил содержит остатки корневищ растений.
17 2,1 м	Открытая литораль. На дне вегетируют роголистник и сосенка.	Темно-серый мелкозернистый песок с <i>ракушей</i> .	Грунт обильно пронизан осколками ракуши. В сентябре образуется рыжий наилок. В микроструктуре обнаруживается фракция тонкого детрита, хитиновые фрагменты.
17А 1 м	Мелководье. Заросли тростника.	Серый мелкозернистый песок с дрейсеной.	В микроструктуре присутствуют следы детрита.

Таблица 1. Типы и структура донных отложений озера Кандры-Куль в мае-сентябре 2012 г. (окончание)

<i>Западный берег</i>			
13 2,1 м	Открытая литораль. На дне - заросли хары.	Серый ил.	Полужидкий жесткий ил. В микроструктуре обнаружены детрит, алеврит, мелкие растительные фрагменты.
13А 0,75 м	Мелководье. Заросли тростника. Дно обильно покрыто дрейсенной.	Серый ил с дрейсенной, («дрейсеновый».)	Преобладает растительный детрит. В сентябре формируется пелитовая фракция. Ил трансформируется в черный, появляется запах сероводорода.
14 2,2 м	Открытая литораль. На дне – заросли хары, дрейсена.	Серый ил с гнилостным запахом.	Грунт содержит гниющую растительность. В микроструктуре: тонкий и грубый растительный детрит.
14А 1 м	Мелководье. Заросли тростника. Дно обильно покрыто дрейсенной.	Серый ил с дрейсенной («дрейсеновый».)	В микроструктуре ила преобладает грубый растительный детрит и фрагменты разложившихся макрофитов .
16 2,8 м	Открытая литораль. На дне – заросли хары, ракуша.	Серый песчанистый ил. (В мае заиленный песок)	К сентябрю накапливается пелит и тонкий детрит, включающий разлагающиеся растительные тяжи. Ил приобретает черный цвет и гнилостный запах.
16А 0,5 м	Мелководье. Заросли тростника.	Однородный плотный рыже-коричневый мелкозернистый песок.	К осени песок заливается и содержит много мелких растительных остатков; алевритовые частицы сцементированы тонким детритом.
<i>Пелагиаль</i>			
2 8,8 м	В грунте обитает дрейсена.	Черный тонкодисперсный ил.	В толще ила – серые и оливковые пятна, сверху – тонкая коллоидная пленка окисленного железа.
3 15,3 м	Профундаль	Темно-серый пелитовый ил. В сентябре – черный пелитовый ил.	Маслянистый, нежный ил; на поверхности коричневые железистые включения; обилие тонкого детрита. В микроструктуре преобладает пелит.
4 8 м	Встречается дрейсена.	Серый мелкоалевритовый ил.	Ил с коричневым наилком; содержит разложившиеся остатки зоопланктона. В микроструктуре преобладает мелкий алеврит.
7 9,2 м	Наблюдается массовое развитие дрейсены.	Темно-серый тонкодисперсный ил с дрейсенной.	Ил пронизан железистыми прослоями, содержит растительный и зоопланктонный детрит В микроструктуре преобладает пелит.
15 7,7 м	Встречается дрейсена.	Серый тонкодисперсный ил.	Верхний слой с коричневым наилком. В микроструктуре – обильный тонкий детрит.

том, преобладают в западном секторе и для них характерно наиболее массовое развитие дрейсены.

Заиленные пески распространены вдоль восточного и южного побережий озера до глубин 1,5-2 м. На более глубоких участках водоема формируются песчанистые, серые, черные алевритовые илы.

Алевритовые илы в зоне открытой литорали озера можно рассматривать как переходный морфотип от фитальных биотопов (зарослей макрофитов) и зоны свободной от растительности к пелагическим сублиторальным и профундальным илам.

Наибольшим разнообразием морфологических проявлений донных осадков представлен юго-западный, западный и северо-западный сектор озера: серые и коричневые мелкозернистые пески, серые и черные алевритовые и тонкодисперсные илы.

Гранулометрический состав донных отложений в литоральных (южный берег) и пелагических зонах оз. Кандры-Куль исследовали в июне и сентябре 2010 г. (рис. 2). Механический состав грунтов является основой типизации донных отложений. Фракционный состав донных осадков определяется в первую очередь дисперсностью седиментационного материала и гидродинамической активностью водных масс [3]. От его состава зависят плотность и влагоемкость донных отложений, влияющие на водообмен, скорость химических реакций и диффузии веществ, процессы физико-химического обмена и ряд биологических процессов в грунтах [16].

Для трех исследованных биотопов характерно преобладание алевритовой фракции размером 0,1 – 0,01 мм, максимально представленной в профундальных илах. Доля алевритовых частиц составляла 47-74% механического состава, увели-

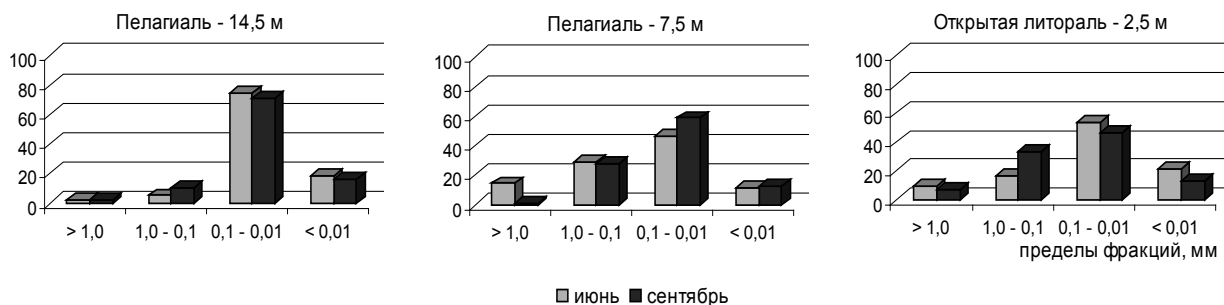


Рис. 2. Гранулометрический состав донных отложений озера Кандры-Куль в июне и сентябре 2010 г.

чиваясь от мелководных участков к глубоководным. Вклад пелитовых фракций (<0,01-0,05 мм), обладающих высокой степенью сорбции биогенных веществ, в профундальные, сублиторальные и литоральные илы изменяется несущественно.

На литорали (ст. 1) и в районе максимальной глубины (ст. 3) происходит снижение процентного содержания алевритовых и пелитовых фракций к осени, а на глубине 7,5 м (ст. 2), напротив, их содержание увеличивается. Разнонаправленность сезонных изменений фракционного состава донных осадков может быть вызвана особенностями качественного состава седиментационного материала и его динамики.

Исследование песчанистых грунтов на северо-восточном побережье озера показало доминирование песчаных частиц средних и мелких размеров 1 – 0,1 мм, доля которых в механическом составе достигает 82%.

Водно-физические свойства и компоненты химического состава.

Глубина в любом водоеме является фактором, систематизирующим пространственно-временную неоднородность распределения вещества в донных отложениях [13]. В озере Кандры-Куль увеличение глубины сопровождается уменьшением температуры, увеличением дисперсности отложений, сдвигом окислительно-восстановительных условий в сторону восстановительных. С глубиной происходит накопление в тонкодисперсных и в газирующих илах общего железа, о чем свидетельствуют положительные корреляции ($R=0,58$; $R=0,96$ при $p < 0,05$).

Диапазон изменения температуры в донных отложениях в период исследования на разных станциях озера составил от $9,0^{\circ}\text{C}$ в сентябре в пелагических илах до $22,7^{\circ}\text{C}$ в зарослях мелководий в июле. Наиболее прогреваемые участки в летние месяцы расположены в литоральных зонах и в зарослях восточного побережья. Повышение температуры в осадках сопровождается снижением содержания органического вещества (ППП) (от $R = -0,35$ до $R = -0,78$ при $p < 0,05$), обусловленные его минерализацией в результате активизации микробиологических процессов в летние месяцы.

Естественная влажность является важной характеристикой водно-физических свойств

грунтов. Содержание влаги находится в функциональной связи с гранулометрическим составом [3]. В целом, в грунтах озера проявляется известная закономерность увеличения влажности от грубодисперсных осадков к тонким илам (табл. 2). Песчанистые осадки и заиленные пески обладают влажностью 26-65%, из них минимальной - плотный мелкозернистый рыже-коричневый песок (ст. 16А). В песчанистых и алевритовых илах влажность изменялась от 60% до 71%, в тонких серых и черных илах – от 64% до 93%. В летние месяцы происходило увеличение влажности по всему профилю водоема. Дальнейшие изменения осенью сопровождались увеличением или снижением влаги в различных морфотипах осадков, что вызвано пространственно-временной трансформацией отложений, обусловленной особенностями диагенеза [20], динамикой водных масс, локальными особенностями биотопов.

На фоне изменения структуры верхнего слоя ила «влажность отложений становится главным структурообразующим центром, влияющим на связь влажности с показателем pH среды» [13]. Наиболее выраженные обратные связи влажности с pH обнаружены в тонких серых ($R = -0,64$ при $p < 0,05$) и алевритовых ($R = -0,54$ при $p < 0,05$) илах. В трансформирующихся осадках, т.е. изменяющих в течение сезона свою структуру в сторону накопления тонких фракций, к которым относятся заиляющиеся пески и песчанистые илы, обнаруживаются достоверные положительные корреляции ($R = +0,45$ при $p < 0,05$).

В 2010 г. исследовался объемный вес (отношение веса образца к его объему) грунтов озера. Объемный вес снижается от песков к илам. Так, его значения в песчанистых осадках составляли $1,62 \text{ г/см}^3$, в серых пелагических и макрофитных илах - $1,3 \text{ г/см}^3$ и $1,2 \text{ г/см}^3$.

Активная реакция среды (pH) и окислительно-восстановительный потенциал (rH_2) являются важными показателями, характеризующими интенсивность химических, биологических процессов, протекающих в толще донных отложений. В водных экосистемах pH выступает важным фактором в карбонатном равновесии и в соотношении форм фосфора, железа.

В донных отложениях озера не обнаружено общих закономерностей рН с типами грунтов, что обусловлено на наш взгляд гетерогенностью осадков и деятельностью микроорганизмов. Можно отметить, что в мае 2012 г. в литоральных осадках складывались слабокислые условия среды (рН = 6,25 – 6,85), за исключением серых илов западного берега с нейтральными и слабощелочными грунтами (рН = 7,0 – 7,35). Для пелагических

илов на глубоководных станциях характерны в основном нейтральные – слабощелочные значения среды (рН = 7,0 – 7,4).

В сезонной динамике происходит в основном снижение рН илов до слабокислых (рН = 6,5 – 6,9) в летние месяцы в результате активизации донной анаэробной микрофлоры и повышение в сентябре до нейтральных и слабощелочных значений (табл. 2). Однако, в слабокислых - нейтральных

Таблица 2. Средние значения физико-химических показателей (\pm доверительный интервал) донных отложений озера Кандры-Куль в мае-сентябре 2012 г.

Показатели	Пелагические тонкодисперсные илы	Тонкие илы с интенсивным газообразованием	Серые илы	Алевритовые илы	Песчаные илы, заиленные пески	Песок
Май						
Глубина, м	11,2 \pm 3,5	2,3 \pm 0,5	2,3 \pm 0,2	4,2 \pm 3,8	2,2 \pm 0,3	2,2 \pm 0,1
Температура, °С	10,2 \pm 2,8	12,8 \pm 0,5	14,1 \pm 0,2	13,5 \pm 1,5	13,6 \pm 2,7	15,2 \pm 2,1
рН	7,21 \pm 0,16	6,83 \pm 0,15	7,38 \pm 0,05	7,00 \pm 0,40	6,48 \pm 0,44	6,81 \pm 0,16
rH ₂	11,1 \pm 2,1	11,5 \pm 0,9	12,7 \pm 0,6	11,4 \pm 1,5	13,4 \pm 0,0	13,3 \pm 0,9
Влажность, %	68,6 \pm 7,5	66,2 \pm 0,3	70,4 \pm 0,7	69,6 \pm 5,9	65,0 \pm 9,8	36,9 \pm 8,5
Потери при прокаливании, %	13,6 \pm 1,4	24,1 \pm 7,6	7,9	11,3 \pm 1,7	6,4 \pm 5,9	3,5 \pm 1,7
Карбонаты, мг С/г	38,4 \pm 13,8	39,3 \pm 32,9	44,1	35,5 \pm 12,1	24,9 \pm 12,9	40,1 \pm 10,8
Fe общ, мг/г	3,0 \pm 0,8	3,1 \pm 2,4	1,2 \pm 0,1	2,2 \pm 1,1	1,7 \pm 0,8	1,0 \pm 0,4
P мин, мкг/г	54,7 \pm 18,8	41,4 \pm 2,3	50,6	47,0 \pm 6,4	45,0 \pm 10,2	48,1 \pm 22,1
P общ, мкг/г	229,3 \pm 16,3	183,8 \pm 28,1	192,7	224,1 \pm 17,4	220,4 \pm 142,9	239,4 \pm 74,0
Июль						
Глубина, м	10,6 \pm 3,4	2,3 \pm 0,6	2,1 \pm 0,1	4,1 \pm 3,6	2,0 \pm 0,9	1,8 \pm 0,6
Температура, °С	15,2 \pm 3,6	21,0 \pm 0,0	19,0 \pm 0,2	21,4 \pm 1,9	22,0 \pm 1,2	22,6 \pm 0,7
рН	6,78 \pm 0,15	6,65 \pm 0,10	6,63 \pm 0,15	6,83 \pm 0,41	6,76 \pm 0,11	6,99 \pm 0,19
rH ₂	10,5 \pm 1,3	9,5 \pm 0,9	10,3 \pm 2,1	10,9 \pm 1,4	12,7 \pm 1,9	12,4 \pm 3,8
Влажность, %	70,9 \pm 7,4	88,6 \pm 1,8	93,2 \pm 0,3	73,2 \pm 7,7	70,3 \pm 16,5	39,4 \pm 9,3
Потери при прокаливании, %	13,3 \pm 4,0	11,2 \pm 1,2	13,6 \pm 0,5	12,0 \pm 1,6	11,4 \pm 1,4	3,7 \pm 0,7
Карбонаты, мг С/г	34,5 \pm 10,2	37,2 \pm 34,1	40,7	31,2 \pm 9,5	26,0 \pm 5,7	23,6 \pm 9,2
Fe общ, мг/г	3,5 \pm 1,6	3,9 \pm 3,6	2,5 \pm 1,0	3,2 \pm 0,5	2,1 \pm 0,8	1,1 \pm 0,4
P мин, мкг/г	29,6 \pm 29,4	62,6 \pm 44,5	62,7	71,9 \pm 50,1	39,7 \pm 17,2	51,0 \pm 23,6
P общ, мкг/г	295,1 \pm 27,9	355,3 \pm 52,0	393,0 \pm 11,9	312,9 \pm 15,4	347,4 \pm 61,4	283,3 \pm 26,1
Сентябрь						
Глубина, м	9,1 \pm 3,9	2,2 \pm 0,6	н. д.	4,2 \pm 3,7	1,8 \pm 1,0	1,7 \pm 0,8
Температура, °С	12,9 \pm 0,6	13,6 \pm 0,2	н. д.	13,5 \pm 0,2	13,3 \pm 0,6	12,7 \pm 0,5
рН	7,48 \pm 0,21	7,13 \pm 0,24	н. д.	7,19 \pm 0,40	7,29 \pm 0,33	7,44 \pm 0,33
rH ₂	12,6 \pm 1,6	10,2 \pm 2,4	н. д.	13,8 \pm 1,9	15,3 \pm 2,4	16,4 \pm 3,6
Влажность, %	72,9 \pm 6,82	62,2 \pm 0,4	н. д.	65,7 \pm 5,5	79,9 \pm 11,0	45,8 \pm 12,7
Потери при прокаливании, %	19,1 \pm 2,5	13,9	н. д.	17,5 \pm 1,1	19,3 \pm 1,4	11,0 \pm 2,2
Карбонаты, мг С/г	32,9 \pm 14,0	18,6	н. д.	20,2 \pm 8,1	19,6 \pm 9,0	15,2 \pm 11,5
Fe общ, мг/г	2,4 \pm 0,5	0,8	н. д.	1,9 \pm 0,6	2,7 \pm 1,1	0,9 \pm 0,2
P мин, мкг/г	44,5 \pm 22,4	22,2	н. д.	32,5 \pm 4,8	33,7 \pm 16,6	19,1 \pm 9,9
P общ, мкг/г	167,3 \pm 6,1	161,2	н. д.	175,5 \pm 14,1	204,3 \pm 15,3	259,7 \pm 128,8

песках и песчанистых илах не регистрировалось летнего снижения рН; для них характерно последовательное увеличение в течение сезона до рН = 7,0–8,0.

Распределение окислительно-восстановительного потенциала отложений контролируется, как известно, их механическим составом, скоростью аэробной деструкции органического вещества, содержанием кислорода в придонных слоях. По данным Н.И. Семенович [20] величина окислительно-восстановительного потенциала также в значительной степени связана с редукцией сульфатов в присутствии органического вещества различного генезиса. В заросшем мелководье озера восстановительные условия определяются также степенью разложения отмирающей растительности. Для донных отложений озера характерны анаэробные и микроаэробные (восстановительные) условия (табл. 2). С мая по июль во всех типах илов происходило снижение окислительно-восстановительного потенциала, обусловленное летней активизацией микрофлоры. При этом самые низкие значения ($rH_2 = 9$) регистрировались в анаэробных пелагических илах, а также в илах, в которых интенсивно протекают анаэробные деструкционные процессы с газообразованием: в газифицирующихся илах с запахом ацетилена (ст. 9) и в сероводородных (ст. 12) илах. В сентябре в результате осеннего перемешивания водной толщи окислительно-восстановительный потенциал в илах повышается, и устанавливаются в основном восстановительные условия. На мелководьях в песчанистых илах (ст. 16) и в песках (ст. 16А) в сентябре регистрировались аэробные условия ($rH_2 = 18-24$).

Из достоверных связей получены обратные корреляции rH_2 с общим железом ($R = -0,60$ при $p < 0,05$) в тонкодисперсных пелагических илах; с ППП ($R = -0,88$ при $p < 0,05$) в серых илах и ППП ($R = -0,92$ при $p < 0,05$) в газифицирующихся илах. Почти во всех типах илов обнаружены отрицательные корреляции rH_2 с общим и минеральным фосфором, при этом диапазон корреляций составляет от $R = -0,35$ до $R = -0,69$ (при $p < 0,05$). Исключение составляет газифицирующий ил с запахом ацетилена, где устанавливаются положительные корреляции rH_2 с общим ($R = 0,60$ при $p < 0,05$) и минеральным ($R = 0,40$ при $p < 0,05$) фосфором.

Органическое вещество, определяемое по потерям при прокаливании (ППП) в течение весенне-летнего сезона изменялось в широких пределах – от 2,5 % в песчанистых осадках северного побережья до 28% в тонких детритных илах. В целом для озера сохраняются общеизвестные закономерности возрастания содержания органического вещества от грубозернистых осадков к тонкодиспергированным [20], а также влияния глубины озера на содержание органического вещества в осадках, характерного для неглубоких озер [13]. В экосистеме озера значимым фактором

в накоплении органического вещества локально выступает водная растительность. Так, в илах, покрытых урутью и сосенкой (ст. 11, 12, 16) регистрировалось увеличение ППП с мая по сентябрь от 3% до 20%, обусловленное поступлением органического вещества в донные отложения при разложении макрофитов. Максимальные значения ППП (21–28%) выявлены на мелководьях в илах, обильно покрытых погруженной мягкой водной растительностью (ст. 9, 12).

В сезонном изменении выявлена тенденция поступательного накопления органического вещества к осени во всех типах донных отложений (табл. 2). Исключение составляют илы с интенсивным газообразованием (ст. 9, 12). Для них характерно максимальное накопление органического вещества в мае ($24,1 \pm 7,6\%$) и резкое его снижение в июле ($11,2 \pm 1,2\%$) с незначительным увеличением в сентябре (13,9%). Это объясняется тем, что в летние месяцы повышение температуры и обилие питательных веществ создают на этих участках благоприятные условия для развития интенсивных анаэробных деструкционных процессов сульфатредукции и метаногенеза, о чем свидетельствует также снижение окислительно-восстановительного потенциала rH_2 в среднем с 12 до 10 (табл. 2). Подобная тенденция изменения содержания органического вещества, но с меньшей интенсивностью, отмечена для глинистого песка (ст. 8). Здесь основную роль играют глинистые частицы, обладающие свойством сорбировать органическое вещество.

На основе корреляционного анализа выявлены специфичные связи ППП с некоторыми факторами среды. В микроаэробных серых и алевроитовых илах отрицательные корреляции ППП и карбонатов ($R = -0,71$; $R = -0,79$ при $p < 0,05$) могут свидетельствовать о минерализации органического вещества, сопровождающейся увеличением потока HSO_3^- со дна. Влажность выступает значимым фактором в накоплении органического вещества в тонкодисперсных илах ($R = 0,69 - 0,71$ при $p < 0,05$). По отношению к температуре выявлены отрицательные связи, особенно ярко выраженные в песчанистых илах и заиленных песках ($R = -0,51$), в песках ($R = -0,71$ при $p < 0,05$), в илах с газообразованием ($-0,78$ при $p < 0,05$), обусловленные усилением микробиологической деструкции органического материала. В газифицирующихся илах с запахом ацетилена обнаружена высокая отрицательная связь ППП с окислительно-восстановительным потенциалом среды ($R = 0,92$ при $p < 0,05$), по-видимому, возникающая в процессе метаногенеза.

Общий и минеральный фосфор. Содержание общего фосфора в донных отложениях в течение сезона составляло 119,2–443,2 мкг/г. При общей закономерности увеличения $P_{общ}$ от крупнозернистых осадков к илам наблюдается возрастание его величин локально на участках, обогащенных

растительным материалом. Реальным источником фосфора на таких участках является процесс отмирания некоторых видов погруженной водной растительности [13]. Так, наиболее обогащены $P_{\text{общ}}$ серые и черные илы (ст. 12А, 13 - 15) в западном секторе озера, газирующие илы (ст. 9, 12), макрофитный ил (ст. 10) и алевритово-песчаные илы (ст. 11) восточного побережья. Концентрированию фосфатов в тонкозернистых слабощелочных песках (ст. 17, 17А) в сентябре, расположенных на аэрированном мелководье, может способствовать жизнедеятельность фосфатаккумулялирующих бактерий, которые наиболее активно развиваются в обогащенных питательными веществами средах с рН 7,1-9,4 [21].

Установлена прямая зависимость концентрации фосфора в грунтах от содержания в них кислотоэкстрагируемого железа [23]. В условиях экосистемы озера такая зависимость проявляется в серых и алевритовых илах ($R = 0,79$ при $p < 0,05$). В пелагических илах с железистыми образованиями (ст. 1 - 4, 7, 15) содержание общего фосфора обусловлено сорбцией фосфатов гелевыми комплексами железа [13]. Наблюдалось высокое содержание $P_{\text{общ}}$ в мае в глинистых песках с рН 6,6 (ст.8), что обусловлено ростом сорбции фосфатов на глинах при понижении рН илов [13].

Содержание минерального фосфора изменяется в пределах от 4,1 мкг/г до 112,8 мкг/г. Доля $P_{\text{мин}}$ в общем фосфоре в среднем составляет $17,7 \pm 2,7\%$ и не превышает 44 % от общего, что свидетельствует о преобладании в донных отложениях озера органических форм фосфора. Максимальные концентрации $P_{\text{мин}}$ сосредоточены в пелагических илах (ст. 4, 15) и в газирующих илах на ст. 9. Следует отметить высокое содержание $P_{\text{мин}}$ в песках северного берега на станции 5С, расположенной в районе жидкого стока с водосборной территории.

Выявлены положительные связи минерального фосфора с содержанием карбонатов в тонкодисперсных илах ($R = 0,65$; $R = 0,75$ при $p < 0,05$). Такие высокие корреляции могут давать апатитовые формы (соединения фосфора, связанные с кальцием) минерального фосфора [3] вследствие адсорбции и соосаждения с карбонатами.

В сезонной динамике для общего фосфора характерно увеличение во всех илах его концентраций в июле и снижение в сентябре (табл. 2). Напротив, в сезонной динамике минерального фосфора обнаружено три тенденции в зависимости от типа отложений. В глубоководных тонкодисперсных илах содержание минерального фосфора изменяется противоположно общему. В литоральных алевритовых илах и в зоне метаногенеза (ст. 9) минеральный фосфор увеличивается в июле и уменьшается в сентябре. В трансформирующихся осадках (ст. 11, 16, 10А), концентрации минерального фосфора к осени постепенно снижаются.

Общее железо. В 2012 г. содержание $Fe_{\text{общ}}$ в донных отложениях в мае - сентябре варьировало от 0,53 мг/г до 5,73 мг/г сухого грунта (табл. 2). Соединения железа связаны с тонкими частицами отложений, наиболее гигроскопичными [13], что обуславливает их накопление в глубоководных зонах водоема. Влажность оказывает немаловажное влияние на накопление $Fe_{\text{общ}}$, о чем свидетельствует прямая корреляция ($R = 0,73$ при $p < 0,05$). Максимальных концентраций (4,30 - 5,37 мг/г) $Fe_{\text{общ}}$ достигает в илах, имеющих влажность 72 - 94%: глубоководных пелагических (ст. 2, 3), сероводородных (ст. 12, 16) и в черных маслянистых (ст. 12А) илах. В пелагических тонкодисперсных илах железо концентрируется в виде коллоидных образований. Минимальные концентрации $Fe_{\text{общ}}$ (0,53 - 0,93 мг/г) содержатся в плотных песках северного побережья. В территориальном распределении тонких илов на литорали, обогащенных железом, важным фактором выступает температура ($R = 0,68 - 0,90$ при $p < 0,05$), по-видимому, за счет увеличения скорости окислительно-восстановительных реакций. Корреляции общего железа с окислительно-восстановительным потенциалом рассмотрены выше.

В сезонном отношении выявляется общая тенденция увеличения $Fe_{\text{общ}}$ в июле и снижение в сентябре (табл. 2), что контролируется водным и окислительно-восстановительным режимом в грунтах. Другим фактором является вегетирование некоторых макрофитов (камыш, роголистник), которые накапливают железо [14]. Исключение составляет ил (ст. 16), в котором повышается содержание железа к осени за счет трансформации структурных элементов с накоплением тонкого детрита и пелитовых частиц, а также повышения влажности в результате седиментационных процессов.

По данным 2010 г. железо в донных отложениях озера в июне - сентябре находилось преимущественно в восстановленной форме Fe(II). На разнотипных участках водоема в течение исследованного периода концентрации Fe(II) составляли от 84,5% до 100% от общего. Цикл железа в донных отложениях тесно связан с циклом фосфора, как было рассмотрено выше. Гидроокислы железа (лабильное железо) на поверхности донных отложений считаются основными соединениями, сорбирующими фосфаты в аэробных условиях [14].

Суммарное содержание карбонатов ($CO_2 + HCO_3^- + CO_3^{2-}$) в течение исследованного периода изменяется в пределах от 1,2 мгС_к/г до 58,5 мгС_к/г сырого ила. В озере обнаружены грунты, аккумулярующие карбонаты ($C_k = 44,1-58,5$ мг/г), расположенные преимущественно в зарастающих биотопах. К ним относятся серые илы и пески, на дне которых развиваются плотные заросли хары (ст. 8, 14). Хара, отличающаяся обильной кальциевой инкрустацией, после отмирания

обогащает отложения карбонатным веществом [10, 22]. Макрофитные илы (ст. 10) обогащаются карбонатами при разложении биомассы макрофитов. В мелкозернистом песке с ракушей (ст. 17) источником карбонатов служат обильные скопления осколков ракуши. Максимальное количество карбонатов (58,5 мгС_к/г) обнаружено в газифицирующих илах с запахом ацетилена (ст. 9), расположенных в зарослях хары, рогоза, пузырчатки, нитчатки.

Из главных связей карбонатов с компонентами, кроме фосфора, следует отметить обратные корреляции с железом, наиболее проявленные в тонкодисперсных пелагических илах ($R = -0,61$ при $p < 0,05$).

В сезонной динамике происходит четко выраженное снижение карбонатов, за исключением станций 6 и 16, на которых залегают трансформирующиеся илы, значительно изменяющие структуру в результате накопления тонкодисперсных детритных частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Донные отложения озера сформированы песками и илами разнообразного состава. Для водоема характерно неоднородность их территориального распределения, обусловленная условиями среды. В качестве специфических особенностей можно отметить локально сформированные морфотипы: сероводородный ил, газифицирующий ил с запахом ацетилена, макрофитный ил, илы плотно покрытые дрейсенной. Особую группу составляют трансформирующиеся илы, которые значительно изменяют свою структуру в течение сезона в процессе диагенеза.

Важными факторами в формировании грунтового комплекса, химического состава и территориальной зональности на мелководье и литорали является высшая водная растительность, а также согласно полученным данным [9], интенсивные микробиологические процессы. В сезонной динамике структуры осадков выявлена тенденция накопления тонких частиц и изменения соотношения детритных фракций различного генезиса.

На основе корреляционного анализа установлена значимость влияния температуры и влажности на распределение и накопление органического вещества (ППП) и железа. Выявлена неоднозначность связей между свойствами среды и химическими компонентами донных отложений в морфотипах разного механического состава. Обнаружены корреляции в тонкодисперсных илах, не характерные для других типов осадков.

Авторы признательны администрации и сотрудникам НП «Кандры-Куль» за помощь в организации и проведении полевых работ. Особую

благодарность авторы выражают к.г.н. Л.А. Выхристюк за ценные замечания и советы при подготовке статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. Москва: Изд-во Московского университета, 1970. 487 с.
2. Буторин Н.В., Зиминова Н.А., Курдин В.П. Донные отложения верхневолжских водохранилищ. Л.: Наука, 1975. 159 с.
3. Выхристюк Л.А., Варламова О.Е. Донные отложения и их роль в экосистеме Куйбышевского водохранилища. Самара, 2003. 174 с.
4. ГУ ДООПТ РБ. Отчет о НИР № 1 «Рыбоводно-биологическое обоснование (РБО) проведения рыбоводно-акклиматизационных работ на озере Кандры-Куль». Договор подряда № 1-09. Уфа, 2010. 52 с.
5. ГУПНИИБЖДРБ. Отчет о НИР. Оценка современного состояния озера Кандры-Куль в природном парке «Кандры-Куль» и разработка мероприятий по устранению отрицательных последствий антропогенного воздействия на озерную экосистему. Государственный контракт 024/2007. Уфа, 2007. 234 с.
6. Зайков Б.Д. Очерки по озероведению. Ленинград: Гидрометеорологическое изд-во, 1960. 240 с.
7. ИЭВБ РАН. Отчет о НИР. Абиотические характеристики и состояние планктонных и бентосных сообществ озера Кандры-Куль в 2010 г. Тольятти, 2011. 127 с.
8. ИЭВБ РАН. Отчет о НИР. Выявление тенденции и характера межсезонной пространственно-временной изменчивости абиотических (физических и гидрохимических) параметров водной толщи и трофического статуса оз. Кандры-Куль в 2012 г. Тольятти, 2013а. 59 с.
9. ИЭВБ РАН. Отчет о НИР № 01/12 от 01.12.2012. Проведение гидробиологических исследований планктонных сообществ бактерий, простейших (инфузорий) и водорослей (фитопланктона) озера Кандры-Куль в 2012 г. Тольятти, 2013б. 139 с.
10. ИЭВБ РАН. Отчет о НИР договор № 08/12 от 20.12.2011 г. Анализ состояния оз. Кандры-Куль в 2012 г. по данным о физико-химических параметрах среды и развитии планктонных сообществ гидробионтов. Тольятти, 2013в. 91 с.
11. Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 288 с.
12. Кузьяхметов Г.Г., Мифтахова А.М., Киреева Н.А., Новоселова Е.И. Практикум по почвоведению // Учебное пособие. Уфа: РИО БашГУ, 2004. 120 с.
13. Мартынова М.В. Донные отложения как составляющая лимнических экосистем/ Ин-т водных проблем РАН. М.: Наука, 2010. 243 с.
14. Мартынова М.В. Железо и марганец в пресноводных отложениях. Монография. М., 2014. 215 с.
15. Новиков Ю.В., Ласточкина К.О., Болдина З.Н. Методы исследования качества воды водоемов. М.: Медицина, 1990. 400 с.
16. Паламарчук И.К. Грунты дна и их роль в речных водохранилищах // Гидробиол. журн. 1972. Т. 8. № 1. С. 118-127.
17. Реестр особо охраняемых природных территорий Республики Башкортостан. Уфа: Гилем, 2010. 414 с.

18. Романенко В.И. Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах. - Л.: Наука, 1985. - 295 с.
19. Романенко В.И., Рыбакова И.В., Соколова Е.А., Лайош Вереш. Вариант диффузионного метода определения свободной углекислоты, карбонатов, сульфидов в воде и донных отложениях в закрытом сосуде // Гидробиол. журн., 1990. Т 26. № 5. С. 64-69.
20. Семенович Н.И. Донные отложения Онежского озера. Л., Наука, ленингр. отд. 1973. 104 с.
21. Чикин С.М. Фосфатаккумулялирующие бактерии природных и сточных вод: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Пермь, 1998. 24 с.
22. Якушко О.Ф. География озер Белоруссии. Минск: Вышэйш. Шк. 1981. 223 с.
23. Huan P.M., Liav W.K. The nature of a shield lake sediment // Intern. Rev. gesamte Hydrobiol. 1977. Bd. 62, № 3. P. 329-336.
24. Lovley, D.R., Phillips, E.J.P. Organic matter mineralization with reduction of ferric iron in anaerobic sediments // Appl. Environ. Microbiol., 1986. V. 51. P. 683-689.
25. Jacobsen J.S. Sorption of phosphate by Danish lake sediments // Vatten. 1977. № 3. P. 290-297.

CONDITION OF BOTTOM SEDIMENT OF KANDRY-KUL LAKE (BASHKORTOSTAN) IN 2010, 2012

© 2015 N.G. Sherysheva, T.A. Rakitina

Institute of Ecology of the Volga River basin of the RAS, Togliatti

The results of studies of bottom sediments of Kandry-Kul lake in 2010, 2012 are presented. The types of silts and the specificity of their spatial-temporal distribution are revealed. The seasonal changes of the structure of silts are characterized. The water-physical properties, chemical components and their seasonal dynamics are studied. The correlations between the properties of medium and the content of silt components are discussed. The certain relations between depth, temperature, silt moisture, pH, redox potential and the organic matter, content of total and mineral phosphorus, iron, carbonats are defined. *Keywords:* types of bottom sediments, space-temporal distribution, water-physical properties, chemical components, relations.