

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ГРУНТОВОГО КОМПЛЕКСА ВОДОХРАНИЛИЩ ВОЛГИ

СООБЩЕНИЕ 6. ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА И ИХ КАРТИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ*

**В.В. Законнов¹, Д.В. Иванов², Р.Р. Хасанов², А.В. Законнова¹,
В.В. Маланин², А.А. Марасов²**

E-mail: zakonnov46@mail.ru

¹ ФГБУН «Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина
Российской академии наук», пос. Борок, Ярославской обл., Россия

² Институт проблем экологии и недропользования ГНБУ «Академия наук
Республики Татарстан», г. Казань, Россия

АННОТАЦИЯ: Представлен геоинформационный анализ пространственно-временной трансформации структуры и качественного состава грунтового комплекса Куйбышевского водохранилища по материалам гидрологических съемок 1961, 1983, 2001–2002 и 2015–2017 гг. В результате векторизации растровых изображений получено три тематических геоинформационных слоя, каждый из которых содержит данные технологических возможностей картирования для соответствующего периода исследования. Анализ четвертого слоя в районе модельного Волжско-Камского расширения ($F = 1011 \text{ км}^2$), характеризующегося сложностью гривисто-ложбинного рельефа дна, многообразием гидродинамических процессов, определяемых поступлением вод по Волге и Каме, и широким спектром ветро-волновой деятельности, показал незначительные изменения структуры ложа после 2002 г.

В 2015–2017 гг. анализ распределения типов донных отложений на 45 контрольных станциях подтвердил стабильность во всех 10 орографических районах (песах). Увеличение количества станций усложняет мозаику распределения донных осадков и не вносит существенных изменений в их пространственно-временную трансформацию, выявленную в первые годы функционирования водохранилища. Установлено, что на современном этапе грунтовый комплекс водохранилища представлен крупнозернистыми наносами – 44 %, тонкодисперсными отложениями – 42 %, размытыми породами – 13 % и заболоченными почвами – около 1 %, расположенными в районе пойменных островов

* Работа выполнена по федеральному проекту «Оздоровление Волги»

© Законнов В.В., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р., Законнова А.В., Маланин, В.В., Марасов А.А., 2019

Казанского и Чистопольского районов переменного подпора. Содержание органического вещества и биогенных элементов находится на уровне, характерном для донных осадков равнинных водохранилищ. Степень загрязнения Куйбышевского водохранилища тяжелыми металлами в системе Волжского каскада оценена как низкая.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Куйбышевское водохранилище, донные отложения, мониторинг, геоинформационный анализ, картирование, химический состав, р. Волга.

Важнейшим элементом наглядности (визуализации) трансформации структуры и свойств донных отложений является их картирование в пространственно-временном аспекте с использованием ГИС-технологий. Внедрение в практику геоинформационного анализа позволяет осуществить преемственность подходов, способов и методов разных авторов в исследовании наносов водохранилищ в соответствии с технико-методическими возможностями прошлых лет.

Цель статьи – дать оценку качественного и количественного изменения ложа Куйбышевского водохранилища за период многолетней эксплуатации на основе геоинформационного анализа структуры и динамики грунтового комплекса. Интерес к донным отложениям водохранилища возник сразу после его заполнения в 1955–1957 гг. Первые работы были посвящены изучению химического состава донных отложений [1, 2]. Грунтовые съемки начаты в 1961 г. [3], продолжены в 1983 г. [4], в 1983–1993 гг. [5, 6], 2001–2002 гг. [1], а также во время комплексных рейсов экспедиционного судна ИБВВ РАН «Академик Топчиев» по Волге и Каме в 2015–2017 гг. [7, 8].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Куйбышевское водохранилище – крупнейший водоем Волжско-Камского каскада. Заполненное одновременно с Горьковским в 1955–1957 гг., оно стало регулятором водного и твердого стоков не только Средней, но и Нижней Волги. После сооружения Нижнекамской (1979 г.) и Чебоксарской (1981 г.) ГЭС площадь водного зеркала Куйбышевского водохранилища уменьшилась до 5900 км² при НПУ 53 м БС (Балтийской системы). Водоохранилище представляет собой ряд озеровидных расширений (песов), речных участков и заливов (рис. 1). Каждый из районов (песов) – это крупное водохранилище (табл. 1).

В данном исследовании использованы материалы грунтовых съемок [3–8]. Методики по отбору, распределению и накоплению донных отложений приведены в сообщении 1 [9]. Характеристики органического вещества (ОВ), биогенных элементов (БЭ) и тяжелых металлов оценены по опубликованным материалам [2, 4–6, 10–12].



Методика анализа грунтового комплекса водохранилищ посредством ГИС включает следующие этапы:

- импорт данных мониторинговых грунтовых съемок в среду программного пакета ГИС;
- формирование структуры и накопление картографической и атрибутивной баз данных создаваемой ГИС;
- разработка алгоритма построения векторных карт донных отложений водохранилищ с учетом их гидрологических и морфометрических характеристик;

Таблица 1. Основные морфометрические характеристики
орографических районов Куйбышевского водохранилища
Table 1. The main morphometric characteristics of the Kuybyshev Reservoir
orographic zones

Район	F	V	H _{ср.}	L
I – Приплотинный	397,0	6,9	17,4	12,0
II – Новодевиченский	455,0	7,1	15,6	18,0
III – Черемшано-Сусканский	678,0	6,5	9,6	14,0
IV – Нижне-Ульяновский	436,0	7,1	16,3	14,0
V – Верхне-Ульяновский	758,0	8,6	11,3	27,0
VI – Нижне-Тетюшский	367,0	3,6	9,8	14,0
VII – Верхне-Тетюшский	547,0	4,5	8,2	15,0
VIII – Волжско-Камский	1011,0	5,8	5,7	30,0
IX – Казанский	651,0	4,0	6,1	10,0
X – Чистопольский	585,0	2,3	3,9	10,0

Примечание: F – площадь водного зеркала, км², V – объем воды, км³, H_{ср.} – средняя глубина, м, L – максимальная ширина, км.

- выявление основных закономерностей пространственно-временной трансформации грунтового комплекса, исходя из возможностей ГИС;
- расчет этапов и скоростей накопления разных типов донных осадков;
- выявление пространственных и временных трендов изменения геохимических свойств подводных грунтов [13].

Предлагаемый алгоритм был реализован в программном пакете MapInfo, позволяющем создавать пространственные объекты путем ввода координат с клавиатуры и оцифровкой растровых изображений. На этапе импорта данных грунтовых съемок Куйбышевского водохранилища в среду программного пакета MapInfo были введены все имеющиеся материалы с разрешением 300 точек на дюйм и сохранены в формате TIFF без потерь качества изображения. Координатная привязка отсканированных изображений грунтовых станций осуществлена на топографической основе (М 1:100 000, 1:25 000) в проекции Гаусса-Крюгера Пулково 1942, зона 9. Карты результатов грунтовых съемок содержат только физические поля, обозначающие определенный тип донных отложений. Для точной привязки было определено от 10 до 20 реперных точек для каждой карты, чтобы средняя ошибка разброса станций (150–1140) не превышала допустимых значений (не более 10 %) [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Донные отложения являются как консервативными, так и динамичными во времени и пространстве компонентами водных экосистем. Формирование и эволюция грунтового комплекса водохранилищ определяются совокупностью внутренних (внутриводоемных) и внешних (бассейновых и планетарных) факторов, включая антропогенный. В качестве модельного участка выбран Волжско-Камский район, наиболее сложный в топографическом отношении (рис. 2). Район представлен гривисто-ложбинным рельефом с характерной старично-русловой и пойменно-озерной водной системой, заливаемой в половодье Волгой и Камой. Весной в зависимости от метеорологических условий в бассейнах рек половодье может совпадать или быть растянутым во времени. После создания водохранилища Волго-Камский плес в течение всего года затоплен двумя генетически-разнородными водными массами и их модификациями с четко выраженной фронтальной зоной между ними, определяемой объемом притока по обеим рекам.



Рис. 2. Топографическая основа ложа модельного Волжско-Камского расширения до его заполнения водами Куйбышевского водохранилища.

Fig. 2. Topographic foundation of the Volga-Kama project expansion bed prior to its filling with the Kuybyshev Reservoir water.

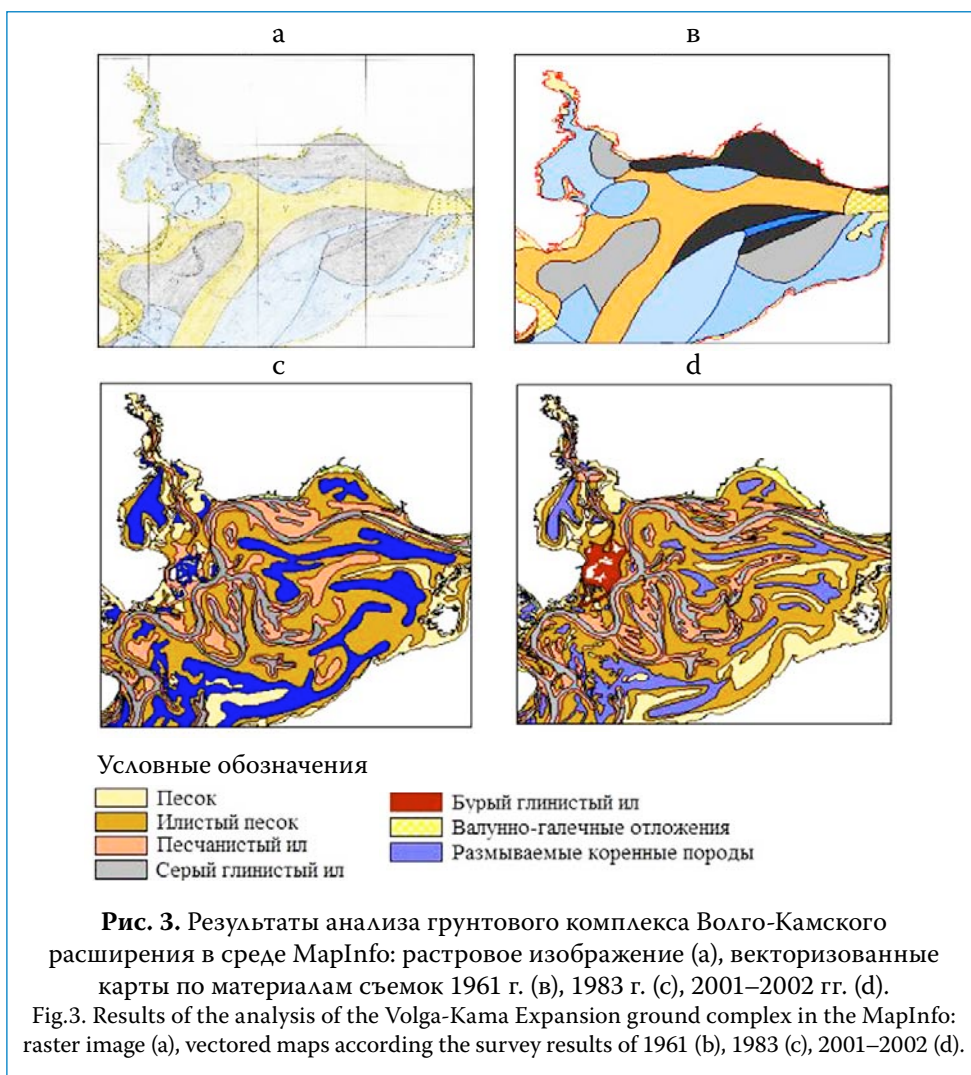
Согласно ранее выполненным натурным измерениям установлено, что на мелководных участках водохранилища преобладает ветровой перенос вод, характеризующийся однонаправленностью по вертикали, а в русловых – в сторону естественных течений рек [14]. При усилении ветра (> 20 м/с) и совпадении его со стоковыми течениями образуются циклональные и антициклональные вихри до 10 км и максимальной высотой волны 2,5–3,0 м. При сложной схеме наибольших скоростей интегрального переноса (при ветрах различных румбов) средняя скорость течения наблюдается по всей толще водного столба (12 м) в пределах 0,8–1,7 м/с, что способствует хорошей промываемости дна. В результате структура ложа весьма неоднородна и представляет собой мозаику зон размыва, трансседиментации (переотложения) и накопления (табл. 2, рис. 3).

Таблица 2. Распределение и накопление донных осадков в Волжско-Камском расширении к 2016 г.
Table 2. The bottom sediments distribution and accumulation in the Volga-Kama expansion up to 2016

Тип осадка	Площадь, км ²	Средняя толщина, см	Объем, млн м ³	Масса, млн т	Среднегодовое накопление		
					мм	тыс. т	кг/м ²
Трансформированные грунты	160	–	–	–	–	–	–
Валуны, галька	8	–	–	–	–	–	–
Песок	245	6,6	161,7	25,8	1,1	430,0	1,8
Илистый песок	183	9,6	175,7	15,8	1,6	263,0	1,4
Песчанистый ил	200	21,0	420,0	27,3	3,5	460,0	2,3
Глинистый ил	215	45,8	984,7	52,5	7,5	875,0	4,1

В результате векторизации растровых изображений района исследования получено три тематических ГИС-слоя, каждый из которых содержит данные мониторинга донных осадков. Съемка 1961 г. характеризуется большой генерализацией, карта на ее основе выглядит упрощенной (рис. 3 в). Карты, построенные на основе грунтовых съемок 1983 г. (рис. 3 с) и 2001–2002 гг. (рис. 3 д), отличаются высокой детализацией и, как следствие, большим количеством типовых разновидностей донных отложений. Анализ четвертого слоя показал незначительные изменения структуры ложа после 2002 г.

В 2015–2017 гг. 45 контрольных станций подтвердили стабильность распределения основных типов донных отложений и их накопление в орографических районах (табл. 3).



Пространственно-временная изменчивость грунтового комплекса и его стабилизация подтверждаются и в целом по водохранилищу (табл. 4, 5). Увеличение количества станций усложняет мозаику распределения донных осадков и не вносит существенных изменений в их пространственно-временную трансформацию, выявленную в первые годы функционирования водохранилища. Доказательством является модельный участок (рис. 3). Поэтому карта донных отложений Куйбышевского водохранилища, составленная по единой геоинформационной схеме для 2002 г., может быть актуальна до 2035 г. (рис. 4).

Таблица 3. Интенсивность осадконакопления в орографических районах Куйбышевского водохранилища к 2016 г.

Table 3. Intensity of sediments accumulating in the Kuybyshev Reservoir orographic zones to 2016

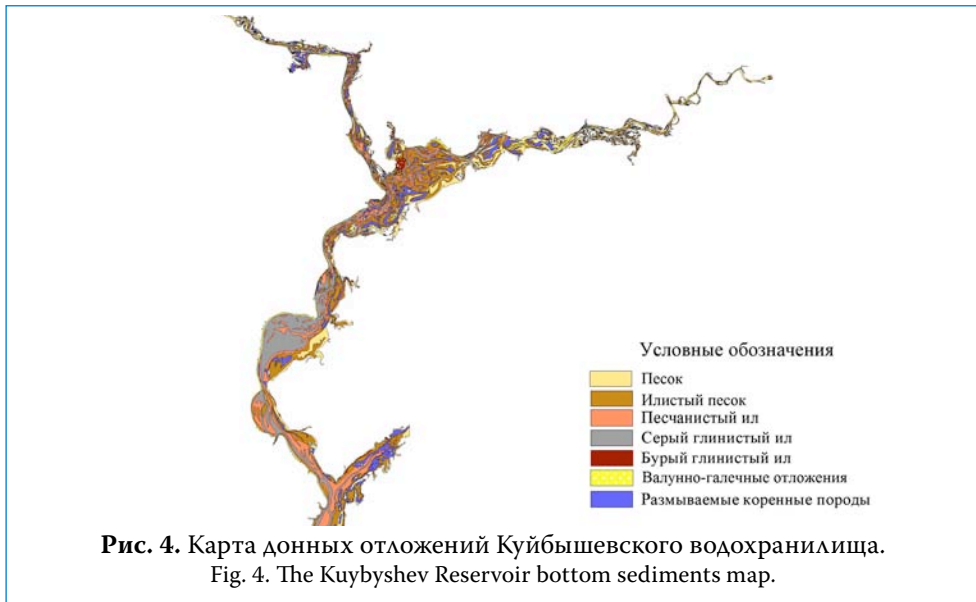
Тип осадка	Площадь, км ²	Средняя толщина, см	Объем, млн м ³	Масса, млн т	Среднегодовое накопление		
					мм	млн т	кг/м ²
I – Приплотинный							
Крупнозернистые	130	13,9	181	8,5	2,3	0,140	1,1
Тонкодисперсные	250	35,0	875	26,4	5,7	0,434	1,7
Всего	380	27,8	1056	34,9	4,6	0,574	1,5
II – Новодевиченский							
Крупнозернистые	137	23,4	321	26,0	3,8	0,436	3,1
Тонкодисперсные	283	47,6	1347	79,6	7,8	1,315	4,6
Всего	420	39,7	1668	105,6	6,5	1,751	4,1
III – Черемшано–Сусканский							
Крупнозернистые	270	11,4	308	32,8	1,9	1,538	2,0
Тонкодисперсные	308	26,4	814	47,9	4,3	0,785	2,5
Всего	578	19,4	1122	80,7	3,2	1,323	2,3
IV – Нижне–Ульяновский							
Крупнозернистые	177	12,3	218	17,5	2,0	0,287	1,6
Тонкодисперсные	250	39,4	986	48,5	6,5	0,796	3,2
Всего	427	28,2	1204	66,0	4,6	1,083	2,5
V – Верхне–Ульяновский							
Крупнозернистые	310	9,3	289	27,1	1,5	0,445	1,4
Тонкодисперсные	373	60,9	2271	126,9	10,0	2,081	5,6
Всего	683	37,5	2560	154,0	6,1	2,526	3,7
VI – Нижне–Тетюшский							
Крупнозернистые	170	15,5	264	22,3	2,5	0,366	2,2
Тонкодисперсные	160	43,7	699	36,9	7,2	0,604	3,8
Всего	330	29,2	965,0	59,2	4,8	0,970	2,9
VII – Верхне–Тетюшский							
Крупнозернистые	250	8,2	206	19,9	1,3	0,326	1,3
Тонкодисперсные	220	54,5	1198	64,5	8,9	1,057	4,8
Всего	470	29,9	1404	84,4	4,9	1,383,0	2,9
VIII – Волжско–Камский							
Крупнозернистые	428	7,9	338	41,6	1,3	0,682	1,6
Тонкодисперсные	415	33,8	1405	79,8	5,5	1,308	3,2
Всего	843	20,7	1743	121,4	3,4	1,998	2,4
IX – Казанский							
Крупнозернистые	340	11,8	401	40,4	1,9	0,728	2,1
Тонкодисперсные	145	50,7	735	50,7	8,3	0,832	5,7
Всего	485	23,4	1136	91,1	3,8	1,560	3,2
X – Чистопольский							
Крупнозернистые	390	9,3	364	44,9	1,5	0,802	2,1
Тонкодисперсные	76	50,5	384	28,8	8,3	0,472	6,2
Всего	466	16,1	748	73,7	2,6	1,274	2,7
Всего по водохранилищу							
Крупнозернистые	2602	11,1	2890	281,0	1,8	4,738	1,8
Тонкодисперсные	2480	43,2	10714	590,0	7,1	9,672	3,9
Всего	5082	26,8	13604	871,0	4,4	14,410	2,8

Таблица 4. Изменения площадей грунтового комплекса, %, год
Table 4. The ground complex area changes, % per year

Тип грунта, донных отложений	1955 г.	1963 г.	1983 г.	2002 г.	2016 г.	2035 г. (прогноз)
Трансформированные грунты (почвы)	(97)	55	17	12	14	12
Крупнозернистые наносы	2	30	40	43	44	45
Тонкодисперсные отложения	1	15	43	45	42	43

Таблица 5. Трансформация осадкообразования
в Куйбышевском водохранилище
Table 5. The Kuibyshev Reservoir sediments formation transformation

Тип осадка	Площадь, км ²	Средняя толщина, см	Объем, млн м ³	Масса, млн т	Среднегодовое накопление		
					мм	млн т	кг/м ²
1983 г. (28 лет)							
Трансформированные грунты	1003	–	–	–	–	–	–
Валуны, галька	118	–	–	–	–	–	–
Крупнозернистые наносы	2243	5,0	1122	92	1,8	3,3	1,5
Тонкодисперсные отложения	2536	28,0	7100	420	10,0	15,0	5,9
Всего (занесение)	5900	17,2	8222	512	6,1	18,3	3,8
2002 г. (47 лет)							
Трансформированные грунты	703	–	–	–	–	–	–
Валуны, галька	104	–	–	–	–	–	–
Крупнозернистые наносы	2458	7,8	1917	217	1,7	4,6	1,9
Тонкодисперсные отложения	2635	33,0	8700	471,0	7,0	10,0	3,8
Всего (занесение)	5900	18,0	10617	688	3,8	14,6	2,5
2016 г. (61 год)							
Трансформированные грунты	700	–	–	–	–	–	–
Валуны, галька	118	–	–	–	–	–	–
Крупнозернистые наносы	2602	11,1	2890	281	1,8	4,8	1,8
Тонкодисперсные отложения	2480	43,2	10714	590	7,1	9,7	3,9
Всего (занесение)	5900	23,1	13604	871	3,8	14,5	2,4



Результаты первой грунтовой съемки показали, что большая часть ложа была занята различными типами пойменных почв с незначительным заилением, а в некоторых местах со слабым размывом [3]. В правобережье формировались валуно-гравийно-галечные наносы, в левобережье – песчаные. Накопление продуктов заиления шло в тальвегах затопленных речных долин, пойменных озерах, затонах, старицах и устьях больших заливов. Основные типы донных отложений в зависимости от гидродинамического воздействия (стоковых и ветровых течений) и с присущими им особенностями распределения по ложу были сформированы в первое десятилетие существования водохранилища. Вторая и третья съемки выявили стадийные закономерности, отмеченные ранее для Волжского каскада [9]. Итоги третьей и четвертой грунтовых съемок показали стабильность структуры ложа и интенсивности осадконакопления (табл. 4, 5). Подтверждением этого являются ориентировочные балансы взвешенных веществ, рассчитанные разными авторами (табл. 6).

Таблица 6. Трансформация балансовых характеристик взвешенных наносов, %
Table 6. The suspended alluvia balance characteristics transformation

Период	Приход			Расход	
	Абразионная деятельность	Сток речных наносов	Продукция гидробионтов	Сброс через гидросооружения	Осадконакопление
1957– 1961 [3]	67,9	32,1	1,0	1,4	98,6
1981 – 1985 [6]	85,4	14,1	0,5	4,6	95,4
1961 – 2002 [7]	85,0	14,0	1,2	5,0	95,0

Несмотря на то что балансы взвешенных наносов носят ориентировочный характер, они достаточно наглядно отражают процессы круговорота вещества и могут быть использованы в качестве основы для расчета балансов биогенных и других химических элементов, а также для экспертной оценки экологического состояния водных экосистем. Уровень содержания ОВ и основных БЭ – углерода, азота и фосфора в донных отложениях точно отражает общую экологическую ситуацию в водоеме, его трофический статус и степень загрязнения [11].

Материалы грунтовых съемок показывают, что содержание органического вещества в пересчете на $C_{\text{общ}}$, определяемого мокрым сжиганием, варьирует от 0,25 до 12,7 %. Величина потерь при прокаливании (ППП) превышает концентрацию $C_{\text{общ}}$ при мокром озолении. $C_{\text{карб}}$ составляет 0,2 – 0,5 % и находится в пределах ошибки анализа. Эта зависимость выражается формулой ($C_{\text{общ}} = 0,65 \text{ ППП}$) для всех типов отложений и увеличивается в ряду: песок (0,59 %) – илистый песок (1,46 %) – песчаный ил (2,80 %) – глинистый ил (5,2 %). Показатели накопления ОВ и БЭ указывают на наличие связи между типом осадка и их валовым содержанием. Концентрации возрастают от песков к илам. Так, в глинистых илах основная доля ОВ (52 – 98 %) сосредоточена в тонкодисперсной фракции отложений ($< 0,05$ мм), которая доминирует в общем спектре гранулометрического состава. В песках и илистых песках роль аккумулятора $C_{\text{орг}}$ играют песчаные и алевритовые фракции детритного происхождения. N и P наиболее интенсивно накапливаются в тонких пелитовых фракциях $< 0,05$ мм (58 – 70 %). В песчаных осадках $> 0,1$ мм их доля составляет немногим более 30 %. Корреляционный анализ, основанный на репрезентативной выборке данных (более 100 проб), свидетельствует о достоверности связи содержания N и P с фракцией $< 0,05$ мм ($r = 0,9$, $p < 0,01$). Содержание ОВ и БЭ находится на уровне, характерном для донных осадков равнинных водохранилищ [10].

Металлы, присутствующие в донных отложениях Куйбышевского водохранилища, в основном характеризуются близкой к нормальной (логнормальной) функции распределения, на что указывает близость их средних арифметических значений и медиан вариационного ряда (табл.7).

Статистический анализ данных показал, что наибольший разброс концентраций характерен для Cd, Pb и Cr ($V = 110 - 220$ %). Такой характер варьирования косвенно указывает на наличие антропогенных источников их поступления в водоем. Колебания содержания Cu, Co, Ni, Zn, Mn и Fe несколько меньше ($V = 50 - 100$ %), однако также превышают условный предел однородности выборки.

Таблица 7. Статистические показатели распределения металлов в донных осадках Куйбышевского водохранилища, мг/кг
Table 7. Statistic indicators of the metals distribution within the Kuibyshev Reservoir bottom sediments, mg/kg

Металлы	M+m	Me	min	max	σ	V, %
Cd	0,82+0,05	0,50	0,01	38,3	1,83	224
Pb	15,2+0,4	13,2	0,1	310,4	17,2	113
Co	11,2+0,2	10,7	0,3	54,7	5,9	53
Cu	28,7+0,7	25,0	0,3	280,3	27,9	97
Ni	45,6+0,6	45,5	0,4	214,2	22,2	49
Zn	59,0+0,9	58,1	0,3	614,1	35,2	60
Cr	41,8+1,9	30,0	0,8	1025,8	72,2	173
Mn	895,1+22,0	773,0	13,1	13362,2	843,2	94
Fe	19581,9+253,3	19685,9	209,1	54712,5	9528,7	49

Примечание: M – среднее арифметическое, m – ошибка среднего, Me – медиана, min, max – минимальное и максимальное значения, σ – среднеквадратическое отклонение, V – коэффициент вариации.

В Куйбышевском водохранилище в связи с зарегулированием водного и твердого стоков имеет место уменьшение балансовых статей поступления взвешенных веществ за исключением первичной продукции гидробионтов, которая постепенно возрастает за счет макрофитов. Несмотря на это, доля абразионных процессов еще более увеличилась, что свидетельствует об их главенствующей роли в формировании донных отложений (табл. 6). Наиболее активными в гидродинамическом отношении являются верхние речные участки водохранилища. По этой причине минимальные концентрации металлов характерны для Казанского и Чистопольского районов переменного подпора, которые отличаются повышенными скоростями течения и формированием песчаных наносов с низкой сорбционной емкостью (табл. 8). Вместе с тем, наблюдается и определенная геохимическая дифференциация волжских и камских отложений, обусловленная различием питающих их природных минералогических провинций. Так, для Чистопольского района характерен повышенный геохимический фон в донных отложениях Cu, Ni и Mn.

В отложениях плесов, расположенных после слияния Волги и Камы, увеличивается доля площадей, занятых глинистым илом, что влечет за собой рост содержания элементов, сорбируемых на тонкодисперсных фракциях. Илистые, богатые органическим веществом отложения озеровидных расширений, более интенсивно накапливают в своем составе Cu, Ni, Zn и Fe. Содержание большинства металлов в илах нижних участков Куйбышевского водохранилища в среднем в 1,3–2,0 раза выше, чем в районах переменного подпора, функционирующих в речном режиме.

Таблица 8. Среднее (медианное) содержание металлов в донных отложениях орографических районов Куйбышевского водохранилища, мг/кг

Table 8. Metal average (median) content in the Kuibyshev Reservoir orographic zones bottom sediments, mg/kg

Районы	Cd	Pb	Co	Cu	Ni	Zn	Cr	Mn	Fe
Казанский	0,40	12,2	9,6	20,4	36,7	56,4	26,3	588,3	15998,4
Чистопольский	0,36	10,4	9,9	25,1	48,0	52,0	29,0	763,1	18795,7
Волжско-Камский	0,36	10,7	11,4	25,4	48,0	53,6	34,4	890,3	19449,9
Верхне-Тетюшский	0,58	15,0	14,3	29,2	60,6	68,3	44,0	790,3	24022,3
Нижне-Тетюшский	0,62	10,8	10,5	18,0	56,9	36,3	30,7	693,6	15231,3
Верхне-Ульяновский	0,67	17,4	13,8	31,3	67,7	81,7	55,8	1098,3	28964,3
Нижне-Ульяновский	0,68	15,9	15,9	26,8	55,9	75,5	41,6	827,3	25712,5
Черемшано-Сусканский	0,56	14,9	12,6	25,6	46,3	64,8	47,8	791,8	13000,0
Новодевиченский	0,68	20,2	13,6	28,7	53,4	77,0	50,8	1088,1	30824,1
Приплотинный	0,68	14,6	12,4	28,3	52,8	71,5	41,2	1025,0	23600,0

Сопоставление средних концентраций металлов в донных осадках Куйбышевского водохранилища с данными по каскаду Верхней Волги не позволило выявить наличие какой-либо закономерности [12, 15]. Во многом это объясняется тем, что процесс аккумуляции и перераспределения металлов в донных отложениях сложен и подчинен большому количеству факторов, включая региональный геохимический фон и наличие локальных источников загрязнения.

В целом донные отложения Куйбышевского и Чебоксарского водохранилищ, в сравнении с верхневолжскими, отличаются повышенным содержанием Fe, концентрации Cu, Co, Cr и Zn в них ниже. Как общую тенденцию следует отметить постепенное снижение концентраций большинства анализируемых металлов в каскаде водохранилищ, что особенно ярко заметно в изменении содержания Cd, Co, Cu, Zn, Cr и Mn. Полученные в рамках проведенного исследования данные подтверждают вывод, что водохранилища играют роль мощных геохимических барьеров на пути миграции металлов [16]. Самоочищение водных масс от соединений металлов происходит преимущественно в результате сорбции и соосаждения на взвешенных веществах минеральной и органической природы, а затем аккумуляции и захоронения в составе донных отложений. «Барьерная» геохимическая функция наиболее характерна для Горьковского водохранилища: накопление соединений Cd, Co, Pb, Cu, Zn и Cr в его донных осадках в 1,5–3 раза превышает уровень аккумуляции этих металлов в расположенных ниже Чебоксарском и Куйбышевском водохранилищах. Как наиболее «загрязненные» металлами, относительно фоновому уровню, можно оценивать Ивановское (Cd, Cu, Zn) и Угличское (Zn) водохранилища. Высокая концентрация Cr наблюдается в донных осадках всех верхневолжских водохранилищ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе геоинформационного анализа структуры и динамики грунтового комплекса Куйбышевского водохранилища от простых картосхем распределения донных осадков с ограниченным количеством станций (1960 г. – 150 ст.) к сложным с максимальным количеством станций (2002 г. – 1140 ст.) создана цифровая модель распределения донных отложений. Возможности данного методического подхода раскрыты еще не полностью. Наиболее актуальная проблема – занесение водохранилища и потеря объема воды в результате осадкообразования, т. к. от этого, в первую очередь, зависит время эксплуатации техногенного водоема, имеющего широкий спектр использования – энергетика, навигация, водопотребление, рыболовство, рекреация.

Результат достигнутой визуализации стал возможным благодаря созданию на примере модельного района цифровой карты верхнего (10 см) слоя пространственного распределения донных осадков по целому ряду физико-химических характеристик, активно взаимодействующих в системе вода – дно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баранов И.В.* Термический и биогидрохимический режимы Куйбышевского водохранилища в 1958–1959 гг. // Тр. Татар. отд. ГосНИИОРХ. 1960. Вып. 9. С. 3–10.
2. *Максимова М.П., Гусева Н.Н.* Органическое вещество в грунтах Куйбышевского водохранилища // Волга-1: Первая науч. конф. по изучению водоемов бассейна Волги. Тольятти, 1968. С. 44–45.
3. *Широков В.М.* Формирование подводного рельефа Куйбышевского водохранилища: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Казань, 1964. 24 с.
4. *Законнов В.В.* Осадконакопление и аккумуляция биогенных элементов в донных отложениях Куйбышевского водохранилища // Формирование и динамика полей гидрологических и гидрохимических характеристик во внутренних водоемах и их моделирование. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. С. 85–39.
5. *Выхристюк Л.А.* Органическое вещество и биогенные элементы донных отложений Куйбышевского водохранилища // Биологическая продуктивность и качество воды Волги и ее водохранилищ. М.: Наука, 1984. С. 112–114.
6. *Выхристюк Л.А., Варламова О.Е.* Донные отложения и их роль в экосистеме Куйбышевского водохранилища. Самара, 2003. 174 с.
7. *Законнов В.В., Иванов Д.В., Законнова А.В., Кочеткова М.Ю., Маланин В.В., Хайдаров А.А.* Пространственная и временная трансформация донных отложений водохранилищ средней Волги // Водные ресурсы. 2007. Т. 34. № 5. С. 573–581.
8. *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 // Тр. Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук. 2018. Вып. 81 (84). С. 35–46.

9. *Законнов В.В., Комов В.Т., Законнова А.В.* Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 1. Донные отложения и их изменения в связи с повышением уровня Чебоксарского водохранилища // Водное хозяйство России. 2015. № 3. С. 4–19.
10. *Законнов В.В.* Аккумуляция биогенных элементов в донных отложениях водохранилищ Волги // Тр. Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина. 1993. Вып. 66(69). С. 3–16.
11. *Иванов Д.В., Паймикина Э.Е., Законнов В.В.* Распределение органического вещества и биогенных элементов в основных типах донных отложений Куйбышевского водохранилища и его притоков на территории РТ // XVI Междунар. конф. «Химия и инженерная экология» / Сб. докладов. Казань: Изд-во «Фолиант», 2016. С. 154–157.
12. *Иванов Д.В., Хасанов Р.Р., Маланин В.В., Законнов В.В.* Пространственное распределение металлов в современных донных отложениях Куйбышевского водохранилища // Вода: химия и экология. 2015. № 4. С. 81–86.
13. *Хасанов Р.Р., Законнов В.В., Иванов Д.В.* Геоинформационный анализ структуры и динамики грунтового комплекса Куйбышевского водохранилища // Бассейн Волги в 21–м веке: структура и функционирование экосистем водохранилищ / Сб. докл. Всерос. конф. Ижевск: Изд-во Пермьяков С.А., 2012. С. 325–329.
14. *Поддубный С.А., Сухова Э.В.* Моделирование влияния гидродинамических и антропогенных факторов на распределение гидробионтов в водохранилищах // Руководство для пользователей. Рыбинск: Изд-во «Рыбинский Дом печати», 2002. 120 с.
15. *Гапеева М. В., Законнов В.В., Гапеев А.А.* Локализация и распределение тяжелых металлов в донных отложениях водохранилищ Верхней Волги // Водные ресурсы. 1977. Т. 24. № 2. С. 174–180.
16. *Перельман А.И., Касимов Н.С.* Геохимия ландшафта. М.: Астрель–200, 1999. 767 с.

Сведения об авторах:

Законнов Виктор Васильевич, д-р геогр. наук, главный научный сотрудник, ФГБУН «Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук», Россия, 152742, Ярославская область, Некоузский р-н, пос. Борок; e-mail: zakonnov46@mail.ru

Иванов Дмитрий Владимирович, канд. биол. наук, заместитель директора по научной работе, Институт проблем экологии и недропользования ГНБУ «Академия наук Республики Татарстан» (ИПЭН АН РТ), Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28; e-mail: water-rf@mail.ru

Хасанов Рустам Равилевич, младший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования ГНБУ «Академия наук Республики Татарстан» (ИПЭН АН РТ), Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28; e-mail: rustamkhasanov88@gmail.com

Законнова Арина Васильевна, старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук», Россия, 152742, Ярославская область, Некоузский р-н, пос. Борок; e-mail: zak@ibiw.yaroslavl.ru

Маланин Виталий Викторович, научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования ГНБУ «Академия наук Республики Татарстан» (ИПЭН АН РТ), Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28; e-mail: wizzle13@mail.ru

Марасов Антон Александрович, младший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования ГНБУ «Академия наук Республики Татарстан» (ИПЭН АН РТ), Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, e-mail: owlrawolta@yandex.ru

Для цитирования: 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.

SPATIAL-TEMPORAL TRANSFORMATION
OF THE VOLGA RESERVOIRS' SOIL COMPLEX
COMMUNICATION 6. THE KUYBYSHEV RESERVOIR BOTTOM SEDIMENTS
AND THEIR MAPPING WITH THE USE OF GEO/INFORMATION TECHNIQUES*

**Viktor V. Zakonnov¹, Dmitriy V. Ivanov², Rustam R. Khasanov²,
Arina V. Zakonnova¹, Vitaliy V. Malanin², Anton A. Marasov²**

E-mail: zakonnov46@mail.ru

¹ Russian Academy of Sciences I.D. Papanin Institute of Inland Waters Biology, pos. Borok. Yaroslav Oblast, Russia

² Academy of Sciences of the republic of Tatarstan Institute of Problems of Ecology and Use of Mineral Resources, Kazan, Russia

Abstract: The article presents the geo/informational analysis of the spatial/temporal transformation of the Kuybyshev Reservoir soil complex structure and qualitative composition according to the materials of hydrological surveys of 1961, 1983, 2001–2002 and 2015–2017. As a result of the raster images vectorization we obtained three topical geo/information layers, every one of them contained the data sufficient for mapping the appropriate period of the researches. Analysis of the fourth layer in the area of the model Volga-Kama Expansion (F = 1011 km²) characterized by a complicated crest-shallow bottom relief, diverse hydrodynamic processes caused by water input via the Volga and the Kama and a wide spectrum of the wind-wave activities has shown insignificant changes in the bed structure after 2002. In 2015–2017 analysis of the bottom sediments types' distribution at 45 control stations has reaffirmed the stability in all 10 orographic stretches (reaches). Increase of the stations' number will make more complicated the bottom sediments distribution mosaic and will not significantly change their spatial/temporal transformation found during the first years of the reservoir functioning. We have found that at the current stage the reservoir soil complex is represented by coarse-grained deposits (44%), fine-grained sediments (42%), diffused rocks (13%) and waterlogged soils (91%) located near the floodplain islands of the Kazan and Chistopol regions of variable backwater. The organic matter and biogenic elements content is at the level typical for the plain reservoirs' bottom sediments. The Kuybyshev Reservoir level of heavy metals pollution in the Volga cascade system has been estimated as low.

* The work has been done in accordance with the "Enhancement of the Volga" Federal project

Key words: Kuybyshev Reservoir, bottom sediments, monitoring, geo/information analysis, mapping, chemical composition, the Volga River.

About the authors:

Viktor V. Zakonnov, Dr. of Geography, Chief Researcher, Russian Academy of Sciences I.D. Papanin Institute of Inland Waters Biology, Russia, 152742, Yaroslav Oblast, Nekouzskiy r-n, pos. Borok; e-mail: zakonnov46@mail.ru

Dmitriy V. Ivanov, Candidate of Biology, Deputy Director on Academic Activities, Junior Researcher; Academy of Sciences of the republic of Tatarstan Institute of Problems of Ecology and Use of Mineral Resources, ul. Dauruskaya, 28, Kazan, 420087, Russia; e-mail: water-rf@mail.ru

Rustam R. Khasanov, Junior Researcher, Academy of Sciences of the republic of Tatarstan Institute of Problems of Ecology and Use of Mineral Resources, ul. Dauruskaya, 28, Kazan, 420087, Russia; e-mail: rustamkhasanov88@gmail.com

Arina V. Zakonnova, Senior Researcher, Russian Academy of Sciences I.D. Papanin Institute of Inland Waters Biology, Russia, 152742, Yaroslav Oblast, Nekouzskiy r-n, pos. Borok; e-mail: zak@ibiw.yaroslavl.ru

Vitaliy V. Malanin, Researcher, Academy of Sciences of the republic of Tatarstan Institute of Problems of Ecology and Use of Mineral Resources, ul. Dauruskaya, 28, Kazan, 420087, Russia; e-mail: wizzle13@mail.ru

Anton A. Marasov, Junior Researcher, Academy of Sciences of the republic of Tatarstan Institute of Problems of Ecology and Use of Mineral Resources, ul. Dauruskaya, 28, Kazan, 420087, Russia, e-mail: owltrawolta@yandex.ru

For citation: Zakonnov V.V., Ivanov D.V., Khasanov R.R., Zakonnova A.V., Malanin V.V., Marasov A.A. *Spatial-temporal Transformation of the Volga Reservoirs' Soil Complex Communication 6. The Kuybyshev Reservoir Bottom Sediments and their Mapping with the Use of Geo/information Techniques // Water Sector of Russia. 2019. No. 2. C. 72-89.*

REFERENCES

1. Baranov I.V. Termicheskiy i biogidrokhimicheskiy rezhimy Kuybyshevskogo vodokhranilishcha v 1958-1959 gg [Thermic and bio/hydro/chemical regimes of the Kuybyshev Reservoir in 1958–1959. // Tr. Tatar. otd. GsNIIORKh. 1960. Vyp. 9. pp. 3–10.
2. Maksimova M.P., Guseva N.N. Organicheskoye veshchestvo v gruntakh Kuybyshevskogo vodokhranilishcha [Organic matter in the Kuybyshev Reservoir soils] // Volga-1: Pervaya nauch. konf. po izucheniyu vodoyomov basseyna Volgi. Togliatti, 1968. pp. 44–45.
3. Shirokov V.M. Formirovaniye podvodnogo relyefa Kuybyshevskogo vodokhranilishcha [Formation of the Kuybyshev reservoir underwater relief]: avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk. Kazan, 1964. 24 p.
4. Zakonnov V.V. Osadkonakopleniye i akkumulyatsiya biogennykh elementov v donnykh otlozheniyakh Kuybyshevskogo vodokhranilishcha [Accumulation/storage of the bottom sediments and biogenic elements in them in the Kuybyshev Reservoir] // Formirovaniye i dinamika poley gidroloicheskikh i gidrokhimicheskikh kharakteristik vo vnutrennikh vodoyomakh i ikh modelirovaniye. SPb.: Gidrometeoizdat, 1993. pp. 85–39.
5. Vykhristyuk I.A. Organicheskoye veshchestvo i biogenniye elementy donnykh otlozheniy Kuybyshevskogo vodokhranilishcha [Organic matter and biogenic of the Kuybyshev Reservoir bottom sediments]// Biologicheskaya produktivnost i kachestvo void Volgi i eyo vodokhranilishch. M.: Nauka, 1984. pp. 112–114.
6. Vykhristyuk I.A., Varlamova O.E. Donniye otlozheniya i ikh rol v ekosisteme Kuybyshevskogo vodokhranilishcha [Bottom sediments and their role in the Kuybyshev Reservoir ecosystem]. Samara, 2003. 174 p.

7. *Zakonnov V.V., Ivanov D.V., Zakonnova A.V., Kochetkova M.Y., Malanin V.V., Khaydarov A.A.* Prostranstvennaya i vremennaya transformatsiya donnykh otlozheniy vodokhranilishch Sredney Volgi [Spatial and temporal transformation of bottom sediments of the Middle Volga reservoirs] // *Vodniye resursy*. 2007. V. 34. No 5. pp. 573–581.
8. *Zakonnov V.V., Zakonnova A.V., Tsvetkov A.I., Sherysheva N.G.* Hidroginamicheskiye 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] // *Tr. Instituta biologiyi vnutrennikh vod im. I.D. Papanina Rossiyskoy akademii nauk*. 2018. Vyp. 81 (84). pp. 35–46.
9. *Zakonnov V.V., Komov V.T., Zakonnova A.V.* Prostranstvenno-vremennaya transformatsiya gruntovogo kompleksa vodokhranilishch Volgi. Soobshcheniye 1. Donniye otlozheniya i ikh izmeneniya v svyazi s povysheniyem urovnya Cheboksarskogo vodokhranilishcha [Spatial-temporal transformation of the Volga reservoirs' soil complex. Communication 1 Bottom sediments and their changes caused by the Cheboksary Reservoir level raising] // *Vodnoye khozyaystvo Rossii*. 2015. No 3. pp. 4–19.
10. *Zakonnov V.V.* Akkumulyatsiya biogennykh elementov v donnykh otlozheniyakh Volgi [The biogenic elements accumulation in the Volga reservoirs bottom sediments] // *Tr. Instituta biologiyi vnutrennikh vod im. I.D. Papanina Rossiyskoy akademii nauk*. 1993. Vyp. 66(69). pp. 3–16.
11. *Ivanov D.V., Paymikina E.E., Zakonnov V.V.* Raspredeleniye organicheskogo veshchestva i biogennykh elementov v osnovnykh tipakh donnykh otlozheniy Kuybyshevskogo vodokhranilishcha i yego pritokov na territoriyi RT [Organic matter and biogenic elements distribution in the main types of bottom sediments of the Kuybyshev Reservoir and its tributaries on the RT territory] // XVI Mezhdunar. konf. "Khimiya i inzhenernaya ekologiya" / *Sb. dokladov*. Kazan: Izd-vo "Foliant", 2016. pp. 154–157.
12. *Ivanov D.V., Khasanov R.R., Malanin V.V., Zakonnov V.V.* Prostranstvennoye raspredeleniye metallov v sovremennykh donnykh otlozheniyakh Kuybyshevskogo vodokhranilishcha [Spatial distribution of metals in the Kuybyshev reservoir contemporary bottom sediments] // *Voda: khimiya i ekologiya*. 2015. No 4. pp. 81–86.
13. *Khasanov R.R., Zakonnov V.V., Ivanov D.V.* Geoinformatsionnyy analiz struktury i dinamiki gruntovogo kompleksa Kuybyshevskogo vodokhranilishcha [Geo/information analysis of the Kuybyshev reservoir soil complex structure and dynamics] // *Basseyn Volgi v 21-me veke: struktura i unktionirovaniye ekosistem vodokhranilishch* / *Sb. dokl. Vseros. konf. Izhevsk: Izd. Permyakov S.A.*, 2012. pp. 325–329.
14. *Poddubniy S.A., Sukhova E.V.* Modelirovaniye vliyaniya gidrodinamicheskikh i antropogennykh faktorov na raspredeleniye gidrobiontov v vodokhranilishchakh [Simulating of the hydrodynamic and anthropogenic factors impact upon the hydrocoles distribution in reservoirs] // *Rukovodstvo dlya polzovatelye*. Rybinsk: Izd-vo "Rybinskiy Dom pečati", 2002. 120 p.
15. *Gapeyeva M.V., Zakonnov V.V., Gapeyev A.A.* Lokalizatsiya i raspredeleniye tyazholykh metallov v donnykh otlozheniyakh vodokhranilishch Verkhney Volgi [Localization and distribution of heavy metals in the Upper Volga reservoirs bottom sediments] // *Vodniye resursy*. 1977. V. 24. No 2. pp. 174–180.
16. *Perelman A.I., Kasimov N.S.* Geokhimiya landshafta [Geo/chemistry of the landscape]. M.: Astreya–200, 1999. 767 p.