

УДК 556.114.7: 556.55

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАКОПЛЕНИЯ УГЛЕРОДА, АЗОТА И ФОСФОРА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР ЧУВАШСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Д. В. Иванов<sup>1</sup>, Е. В. Осмелкин<sup>2</sup>, И. И. Зиганшин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем экологии и недропользования АН Республики Татарстан, Казань, Россия

<sup>2</sup> Государственный природный заповедник «Присурский», Чебоксары, Россия

Выполнен анализ показателей накопления органического углерода, азота и фосфора в донных отложениях разнотипных озер Чувашской Республики. Отмечена дифференциация вещественного состава отложений озер Низменного Заволжья и Приволжской возвышенности по содержанию углерода и азота, связанная с продукционными особенностями озер северной и южной географических провинций. По содержанию фосфора подобная дифференциация отсутствовала. Выявлен квазистационарный характер распределения органического углерода, азота и фосфора в пределах верхней метровой осадочной толщи.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** озера; донные отложения; органическое вещество; биогенные элементы; Чувашская Республика.

### **D. V. Ivanov, E. V. Osmelkin, I. I. Ziganshin. SPATIAL REGULARITIES OF CARBON, NITROGEN AND PHOSPHORUS ACCUMULATION IN LAKE SEDIMENTS OF THE CHUVASH REPUBLIC**

Indicators of organic carbon, nitrogen and phosphorus accumulation in lake sediments of the Chuvash Republic were analyzed. Lakes of trans-Volga Lowlands and the pre-Volga Upland demonstrated a differentiation by the content of carbon and nitrogen in their sediments, associated with the productivity characteristics of lakes in the northern and the southern geographic provinces. No such differentiation was observed for the phosphorus content. The distribution of organic carbon, nitrogen and phosphorus within the top 1-meter of the sediments was quasi-stationary.

**Key words:** lakes; sediments; organic matter; nutrients; Chuvash Republic.

### **Введение**

При проведении исследований озерных экосистем состав и свойства донных отложений (ДО) озер принято рассматривать не только в числе наиболее информативных показателей их текущего экологического состояния, но и в качестве индикаторов различных при-

родных и антропогенных процессов, происходивших в водоеме и на его водосборе в историческом прошлом. ДО, как аккумуляторы органических и минеральных веществ в водной экосистеме, фиксируют нарушения природных геохимических циклов загрязнителей в своем составе и свойствах. Со временем ДО становятся источниками вторичного загряз-

нения водных масс органическими веществами (ОВ) и биогенными элементами, формируя внутреннюю биогенную нагрузку на водоемы. В толще ДО накоплена информация о стадиях развития процессов эвтрофикации в водоеме. Ее расшифровка, включая сведения о концентрации биогенных элементов в отдельных слоях отложений, помогает выделять основные исторические этапы природно-антропогенной трансформации озерных экосистем, формировать прогностические модели их функционирования.

В Среднем Поволжье показатели содержания органического углерода, азота и фосфора в ДО озер ранее исследовались только на территории Республики Татарстан [Иванов, Зиганшин, 2006; Иванов и др., 2011], охватывающей лесостепные участки Низменного и Высокого Заволжья, а также Вятско-Камскую возвышенность в лесной зоне. Для Чувашской Республики (ЧР), в физико-географическом отношении расположенной в пределах лесной части Низменного Заволжья и лесостепи Приволжской возвышенности, аналогичные сведения малочисленны [Озера..., 1976]. При этом они представляют несомненный интерес при установлении общих закономерностей процессов накопления ОВ и биогенных элементов в озерных экосистемах региона, а также при планировании практических природоохранных мероприятий, направленных на решение задач оптимизации землепользования и водопользования и экологической реабилитации водных объектов.

## Материалы и методы

С целью установления региональных показателей накопления органического углерода, азота и общего фосфора в ДО в 2007–2015 гг. были выполнены седиментологические исследования 62 озер на территории ЧР. Дополнительно в выборку данных включены два озера (Провальное и Собакино), расположенные в Республике Татарстан, и два озера (Большой и Малый Юлуксьер) в Республике Марий Эл. Все исследуемые водные объекты расположены в провинциях Приволжской возвышенности (Предволжья) и Низменного Заволжья (Заволжья) [Физико-географическое..., 1964] (рис. 1). По происхождению озерных котловин они относятся к карстовым (12 озер), междюнным (4), пойменным (15) и искусственным (35) водоемам. Площадь водного зеркала исследуемых озер изменялась от 1,12 до 88,23 га, преобладали озера размером 2–5 га. По трофическому статусу 79 % озер от-

несены к эвтрофным, 14 % – к гипертрофным и только 7 % – к мезотрофным.

Отбор поверхностных проб ДО выполнен дночерпателем ДАК-100, кернов – гравитационными трубками ГОИН-1 и ГОИН-1.5. После отбора керны разделяли на равные слои мощностью 5(10) см для последующего анализа.

На водосборной территории озер производили отбор смешанных образцов поверхностных (0–20 см) горизонтов почв с учетом преобладающих элементов рельефа.

В образцах ДО и почв определяли гранулометрический состав [ГОСТ 12536–2014], содержание ОВ по потерям при прокаливании (ППП) при 550 °С [ГОСТ 26213–91], общего (органического) азота ( $N_{орг}$ ) [ГОСТ 26107–84] и общего фосфора ( $P_{общ}$ ) [ГОСТ 26261–84]. Всего проанализировано 442 образца ДО, в том числе 364 образца ДО озер Приволжской возвышенности и 58 образцов ДО Низменного Заволжья.

Выделение типов ДО выполнено на основе классификации В. П. Курдина [1960] и Б. И. Новикова [1985], модифицированной В. В. Законовым [2007].

При рассмотрении географических закономерностей поступления и накопления ОВ в ДО озер в качестве одной из задач рассматривалось приведение результатов его косвенного определения по величине ППП к показателям, выраженным на органический углерод. Для этого применялся эмпирически полученный коэффициент пересчета ППП на содержание ОВ. В основу расчета коэффициента легли данные по вещественному составу ДО озер и малых водохранилищ Средней Волги ( $N = 314$ ), расположенных в сходных физико-географических условиях.

Содержание ОВ (%) рассчитывали по формуле:

$$ОВ = 0,5 \times ППП.$$

При вычислении процентной доли органического углерода в составе ДО использовали коэффициент 0,58, обычно применяемый для пересчета доли  $C_{орг}$  в составе почвенного гумуса [Аринушкина, 1961].

В конечном виде формула пересчета для определения доли  $C_{орг}$  (%) в составе ДО озер выглядит так:

$$C_{орг} = 0,5 \times ППП \times 0,58 = 0,29 \times ППП.$$

Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием пакета Statistica 10.0. При оценках средних величин и сравнении выборок данных использовалась медиана вариационного ряда, а при установлении различных зависимостей – непараметрические критерии.

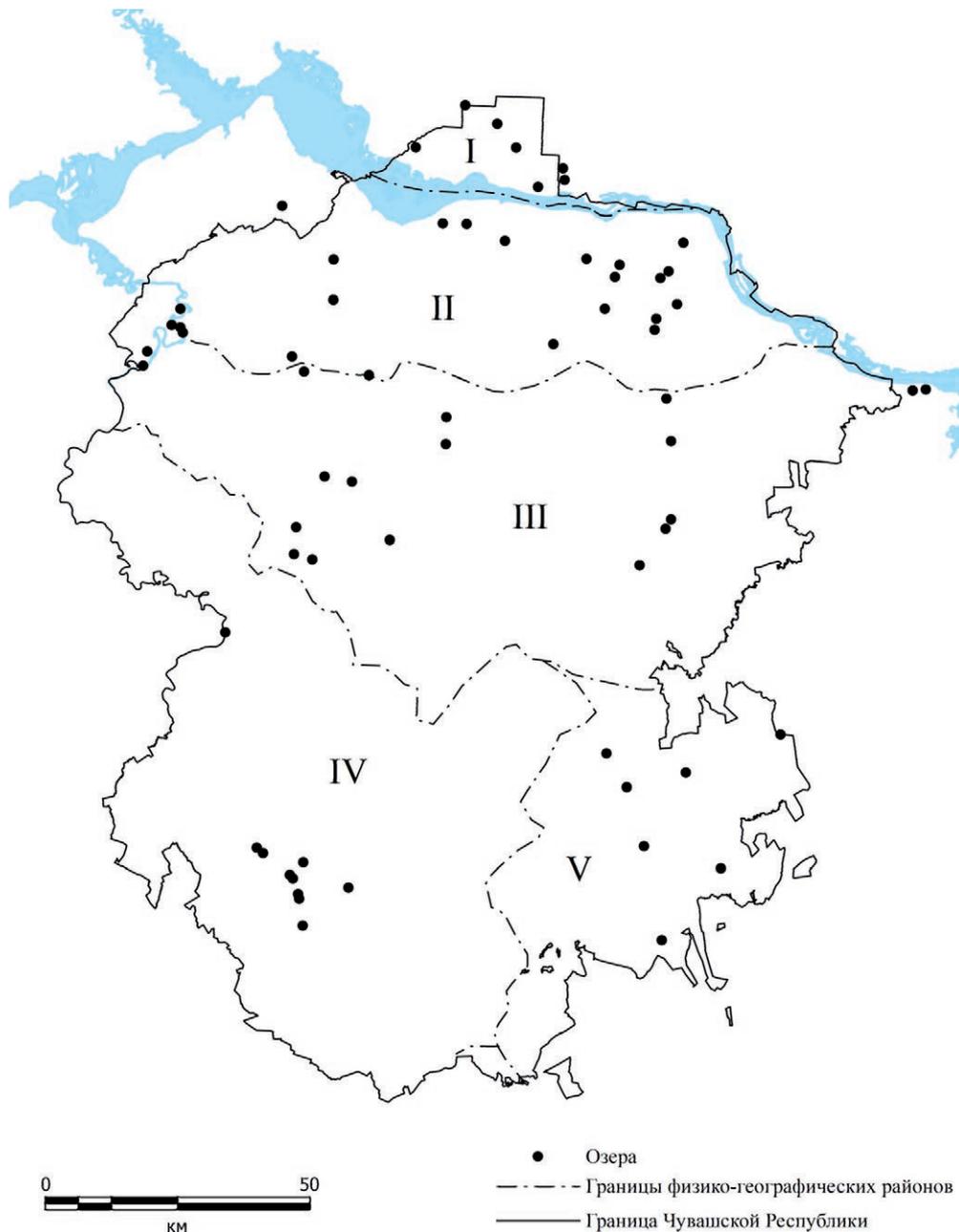


Рис. 1. Карта-схема расположения озер:

Низменное Заволжье: I – Ветлужско-Кокшагский полесский район; Приволжская возвышенность: II – Чебоксарский возвышенно-равнинный район со зрелым эрозийным ландшафтом, III – Цивиль-Кубнинский возвышенно-равнинный лесостепной район эрозийного ландшафта, IV – Засурский полесский район смешанных лесов, V – Средне-Свияжский возвышенно-равнинный остепненный район

Fig. 1. Location of the lakes:

Low-lying Zavolzhye (Trans-Volga Lowlands): I – Vetluzhsko-Kokshagsky polessky (woodland) region; Volga Upland: II – Cheboksary upland-plain region with a mature erosional landscape, III – Tsvil-Kubninsky upland-level forest-steppe region of erosional landscape, IV – Zasurskiy polesskiy (woodland) region of mixed forests, V – Sredne-Sviyazhsky upland-plain steppe region

## Результаты и обсуждение

Скорость накопления осадочного материала в озерах Приволжской возвышенности и Низ-

менного Заволжья отличается широким диапазоном значений – от 70 до 11000 г/(м<sup>2</sup>·год) [Иванов и др., 2018]. Средние показатели аккумуляции вещества на современном этапе при-

родно-антропогенной трансформации лимнических систем ЧР находились на едином для исследуемых провинций уровне – 1600 г/(м<sup>2</sup>·год). Установлено преобладание аутигенного характера накопления ДО в водоемах Низменного Заволжья и терригенного – в Приволжской возвышенности. По результатам анализа величин поступления и накопления осадков в озерах ЧР было установлено, что при переходе от средних за сезон к среднегодовым и среднемноголетним показателям имеющиеся специфические черты динамики осадконакопления в пространственном отношении полностью сглаживались. Темпы современного и исторического осадконакопления в водоемах Приволжской и Заволжской географических провинций республики имели признаки квазистационарности [Иванов и др., 2018], что, несомненно, было важно учитывать при рассмотрении пространственной однородности накопления биогенных элементов в составе ДО.

**Органический углерод.** В озерах ЧР преобладают минеральные типы ДО. Основной диапазон концентраций органического углерода в ДО озер – 2–4 %, что составляет около 2/3 анализируемой выборки (табл. 1). ДО водоемов Приволжской возвышенности и Низменного Заволжья кардинально отличались между собой по накоплению ОВ: в Предволжье преобладали концентрации  $C_{орг}$  от 3,0 до 3,6 %, а в осадках озер Заволжья – от 14,5 до 26,0 %.

Указанные различия обусловлены соотношением основных источников поступления ОВ в озера. Так, для макрофитных карстовых и междюнных озер Низменного Заволжья характерно накопление автохтонного ОВ, продуцируемого высшей водной растительностью. По классификации Л. Л. Россолимо [1964] их можно отнести к озерам – накопителям ОВ. ДО озер провинции представлены торфогенными и торфянистыми илами и отложениями из макрофитов. В осадках некоторых озер провинции визуально фиксировалось ОВ, состоящее из хорошо сохранившихся фрагментов тканей листовых пластинок типичных для южно-таежной подзоны лиственных пород – березы и осины.

Вклад тирфогенного (почвенного) материала в накопление  $C_{орг}$  в заволжских озерах имеет подчиненное значение. Лесные массивы, в окружении которых расположены эти водоемы, произрастают на бедных ОВ дерново-подзолистых почвах, сформированных на хорошо дренируемых песчаных древнеаллювиальных отложениях. Поверхностный сток здесь практически отсутствует.

В геохимической системе «водораздел – озеро» соотношение  $C_{орг}$  в почвах и ДО литорали и профундали озер Заволжья выглядит как 1 : 0,07 : 3 (рис. 2). Литораль озер, как и почвенный покров, сложена мелко- и грубозернистыми песками, накопление в них ОВ выражено

Таблица 1. Содержание органического углерода, азота и фосфора в ДО озер Чувашской Республики (ЧР), %  
Table 1. Organic carbon, nitrogen and phosphorus content in lake sediments of the Chuvash Republic, %

Географические провинции Geographic provinces	Среднее Average	Медиана Median	Min	Max	Коэффициент вариации Coefficient of variation
$C_{орг} / C_{орг}$					
Низменное Заволжье Low-lying Zavolzhye	17,6	15,8	0,04	26,8	45
Приволжская возвышенность Volga Upland	4,0	3,3	0,10	27,4	81
ЧР в целом Chuvash Republic	5,2	3,4	0,04	27,4	106
$N_{орг} / N_{орг}$					
Низменное Заволжье Low-lying Zavolzhye	1,48	1,22	0,05	5,41	76
Приволжская возвышенность Volga Upland	0,22	0,13	0,01	2,63	136
ЧР в целом Chuvash Republic	0,39	0,15	0,01	5,41	167
$P_{общ} / P_{tot}$					
Низменное Заволжье Low-lying Zavolzhye	0,72	0,18	0,01	9,42	226
Приволжская возвышенность Volga Upland	0,21	0,19	0,01	1,03	61
ЧР в целом Chuvash Republic	0,29	0,19	0,01	9,42	232

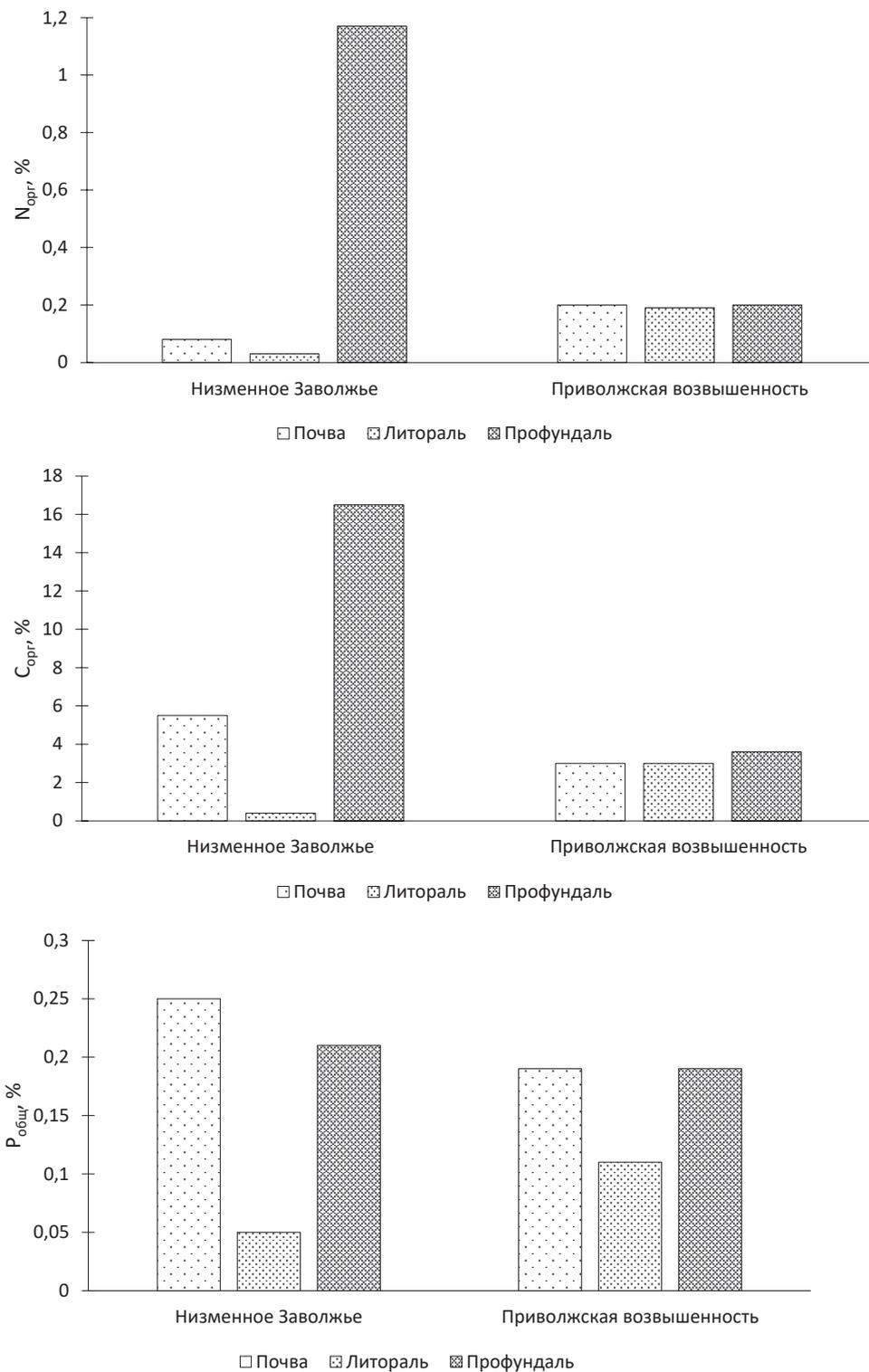


Рис. 2. Содержание органического углерода, азота и фосфора в почвах и поверхностных ДО литорали и профундали озер, %

Fig. 2. Organic carbon, nitrogen and phosphorus content in soils and surface sediments of the littoral and profundal zones of the lakes

более чем в 40 раз слабее, чем в глубоководной зоне озер, где органические частицы формируют осадки типа сапропелей.

На территории Приволжской возвышенности преобладают бессточные озера – аккумуляторы наносов. Их осадки представлены ми-

Таблица 2. Содержание органического углерода, азота и фосфора в кернах ДО в зависимости от глубины залегания, %

Table 2. Organic carbon, nitrogen and phosphorus content in sediment cores depending on the sampling interval, %

Интервал залегания, см Sampling interval, cm	Среднее Average	Медиана Median	Min	Max	Коэффициент вариации Coefficient of variation
$C_{\text{орг}} / C_{\text{орг}}$					
0–10	4,6	3,5	0,1	27,4	86
10–100	5,6	3,3	0,9	28,7	109
$N_{\text{орг}} / N_{\text{орг}}$					
0–10	0,29	0,19	0,03	2,26	121
10–100	0,43	0,13	0,01	5,41	171
$P_{\text{общ}} / P_{\text{tot}}$					
0–10	0,29	0,19	0,01	2,72	130
10–100	0,29	0,19	0,01	9,42	260

неральными типами – в основном песчанистыми и глинистыми илами [Осмелкин и др., 2017] (табл. 1). Органические ДО с содержанием  $C_{\text{орг}}$  10 % и выше отмечены всего лишь в нескольких пойменных водоемах Засурского полесского района смешанных лесов (Присурский заповедник).

Однако в озерах Предволжья с терригенным типом осадконакопления доля органических соединений в общей массе отложений не всегда следовала за распределением суммарной величины аккумуляции вещества. Эффект «разбавления» органической части осадка минеральной, о чем упоминала М. В. Мартынова [2010], у этих водоемов находится в зависимости от характера эрозионных процессов на водосборах. При доминировании плоскостной эрозии в озера поступают гумусовые соединения почв, что приводит к росту содержания в ДО терригенного ОВ. Этот источник пополнения запасов органического углерода в ДО озер Приволжской возвышенности является весьма существенным, учитывая, что в структуре почвенного покрова провинции преобладают темно-серые почвы и черноземы с содержанием гумуса до 9 %. На это указывают практически равные средние показатели содержания углерода в осадках литорали (3,0 %) и профундали (3,6 %) озер, а также в верхних горизонтах почв (3,0 %) водосборных территорий (рис. 2). Другой, также широко распространенный в Предволжье, вид эрозии – линейная (или овражная) служит источником поступления в озера взвешенных частиц – продуктов разрушения горных пород, практически лишенных ОВ, и тем самым усиливает эффект «разбавления» органической части осадка.

Квазистационарность – признак не только количественной стороны озерного седиментогенеза, имеющего разносторонние проявления

на исследуемой территории, но и отражение неизменности его качественной составляющей. Это подтверждено результатами сравнения содержания  $C_{\text{орг}}$  в слоях ДО, отличающихся по времени своего образования, статистическая разница средних значений в которых была недостоверна ( $p < 0,05$ ) (табл. 2). Равенство медианных концентраций  $C_{\text{орг}}$  характерно как для ДО озер Низменного Заволжья, так и для водоемов Приволжской возвышенности.

По результатам усреднения были построены интегральные графики вертикального распределения концентраций  $C_{\text{орг}}$  в колонках отложений в интервалах 0–10, 10–20, 20–30 см и т. д. для совокупности исследованных озер, расположенных в различных физико-географических районах ЧР (рис. 3). Их анализ показал, что в озерах Чебоксарского и Средне-Свияжского районов Приволжской возвышенности концентрации  $C_{\text{орг}}$  в верхних 60 см отличались друг от друга не более чем на 1 %, в Цивиль-Кубнинском районе – на 1,5 %, т. е. были стабильны во времени.

В Засурском районе, где выборка данных включала только озера пойменного типа, минимальная концентрация  $C_{\text{орг}}$  в осадочном профиле отличалась от максимальной уже на 3 %, но при этом и сами концентрации ОВ в ДО этих озер также были заметно выше – 4,5–6,7 %. Кроме того, в отложениях озер Засурья обозначен волнообразный рост содержания ОВ от нижних слоев к верхним как отражение эволюции старичных озер, которые проходят в своем развитии ряд последовательных стадий, включающих зарастание, накопление детритного ОВ и постепенное занесение.

В озерах Низменного Заволжья (Ветлужско-Кокшагский район), напротив, было отмечено снижение доли  $C_{\text{орг}}$  в современных осадках по сравнению со слоями отложений, распо-

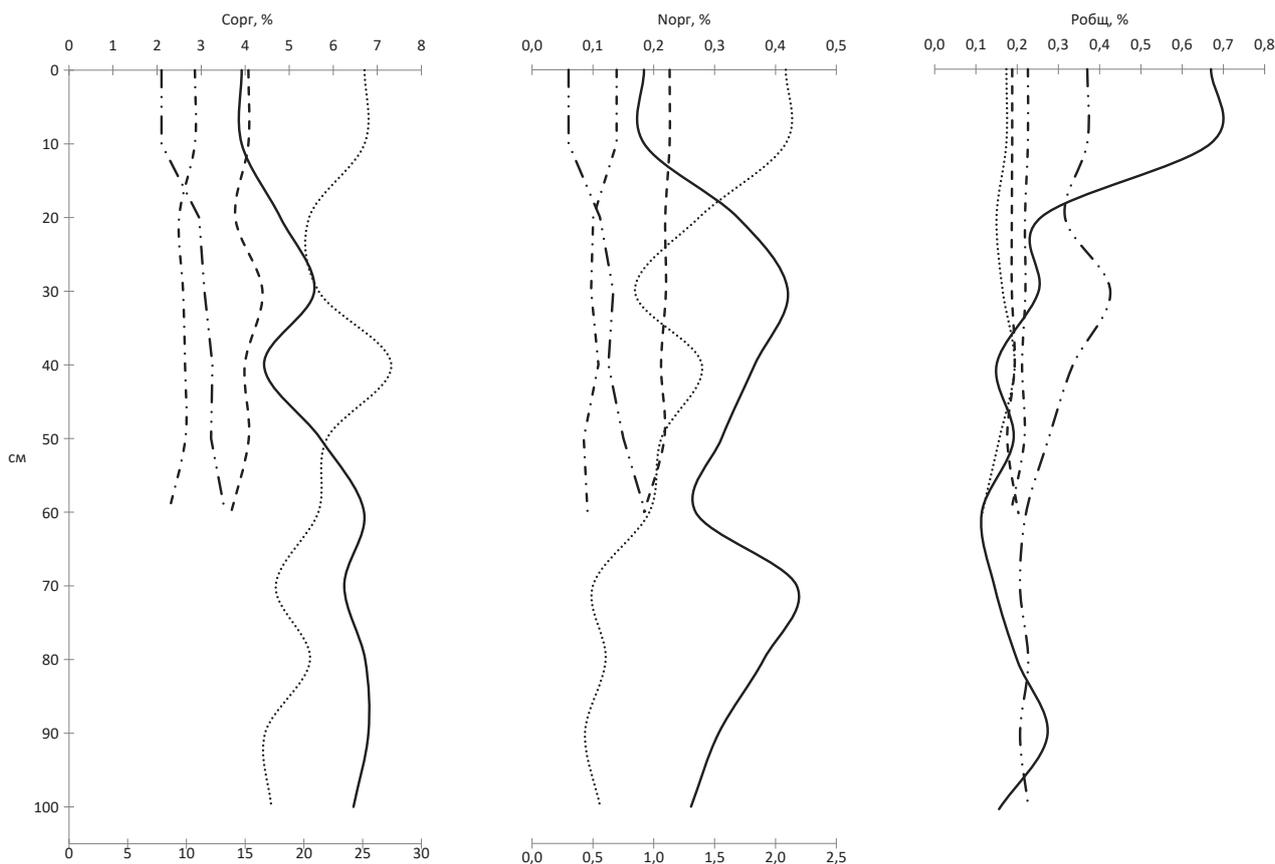


Рис. 3. Характер распределения углерода, азота и фосфора в ядрах ДО. Нижняя ось – Ветлужско-Кокшагский район

Fig. 3. Distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in sediment cores. Lower axis – Vetluzhsko-Kokshagsky District

ложенными на глубине около 1 м, с 25 до 15 % (рис. 3). Причина – сукцессионные изменения, происходящие в экосистемах этих озер.

Молодые искусственные водные объекты – пруды и копани, образованные в руслах малых водотоков, – выделялись выраженной положительной динамикой содержания ОВ в вертикальном профиле. В большинстве прудов в среднем вдвое меньше содержание  $C_{орг}$ , чем в современных отложениях, отмечалось в первые годы после их создания. С завершением активной фазы переформирования берегов и ложа в прудах, как и в крупных водохранилищах, наблюдается постепенное снижение доли внутриводоемных минеральных веществ – продуктов абразии берегов – и возрастание вклада автохтонной органической взвеси. По мере выполаживания рельефа дна, формирования устойчивых мелководий и заселения их высшей водной растительностью роль последней в приходной статье баланса ОВ неуклонно растет.

Установлено, что уровень содержания органического углерода в минеральных ДО озер Чу-

вашии тесно связан с их гранулометрическим составом. В типологическом ряду «пески (илистые пески) – песчанистые илы – глинистые илы» медианное содержание  $C_{орг}$  выражается величинами 0,6; 1,7 и 3,5 % соответственно. Эти значения (в пересчете на ППП) близки к показателям, определенным В.В. Законновым с целью классификации типов грунтов волжских водохранилищ [Законнов, 2007]. Результаты изучения ДО озер ЧР и выполненные ранее исследования состава и свойств ДО озер Республики Татарстан и водохранилищ Средней Волги [Законнов и др., 2007] показывают, что предложенная классификационная схема является универсальной и может использоваться для типизации и характеристики состава и свойств ДО разнотипных водоемов европейской части России.

**Органический азот.** Азот поступает в озера преимущественно в минеральной форме, а также в составе аллохтонного (почвенного) ОВ [Мартынова, 2010]. В эвтрофируемых озерах значительное развитие получают сине-

зеленые водоросли, которые обладают способностью фиксировать молекулярный азот из атмосферы.

Дальнейший вектор движения соединений азота в водной экосистеме связан с их аккумуляцией в живом веществе бактериальной массы, планктона, высшей водной растительности, бентоса и рыб. После отмирания биомассы часть накопленного в ней азота высвобождается в водную толщу, другая проходит более длительную стадию регенерации, находясь в составе ДО.

Темпы депонирования  $N_{орг}$  в ДО зависят от качественного состава и объемов поступления в них органических остатков, а также от скорости преобразования соединений органического и минерального азота в ходе седиментации и осадкообразования. Деструкция ОВ обуславливает высвобождение азота в водную толщу и последующее включение в новый цикл биологического круговорота в водоеме. В этой связи следовало ожидать тесной количественной взаимосвязи установленных показателей накопления органического углерода в ДО озер Чувашии с аналогичными показателями аккумуляции соединений азота.

Статистические показатели распределения азота в ДО озер ЧР представлены в табл. 1. В озерах преобладают осадки с содержанием  $N_{орг}$  от 0,01 до 0,50 %. Показатели среднего содержания и варьирования  $N_{орг}$  в ДО озер республики не отличаются от аналогичных характеристик, установленных для мезотрофных озер европейской части России [Мартынова, 2010; Белкина, 2011]. В эту группу попадают большинство озер Приволжской возвышенности и некоторые озера Низменного Заволжья. В ДО озер Заволжья находится в среднем в 9,4 раза больше азота, что обусловлено соответствующим уровнем накопления ОВ в водоемах, расположенных в этой провинции.

Структурные связи между азотом и углеродом в ДО указывают на единство источников их поступления и подтверждаются значимыми ( $p < 0,05$ ) коэффициентами корреляции (Низменное Заволжье  $r = 0,91$ , Приволжская возвышенность  $r = 0,68$ ), а также преимущественно синхронным характером изменения их концентраций в вертикальном профиле отложений (рис. 3).

Внешняя биогенная нагрузка (как азотная, так и фосфорная) на водоемы Приволжской возвышенности на протяжении десятилетий формировалась за счет поступления растворенных и взвешенных минеральных и органических веществ с распаханых водосборов этой части ЧР. Сложная экономическая ситуация, в которой страна находилась примерно до

конца девяностых годов XX в., привела к существенному снижению объемов вносимых в почву удобрений, что положительно сказалось на поступлении биогенных элементов в озеро и, соответственно, на качестве воды. При этом весомый пул азота, имеющийся в почвах, способствовал формированию довольно сглаженной картины его поступления и накопления в ДО (рис. 3). Среди водораздельных озер только в Цивиль-Кубнинском районе заметно снижение концентраций  $N_{орг}$  в слое 10–20 см, соответствующем этому периоду.

В современных ДО озер большинства физико-географических районов ЧР обозначился отчетливый тренд к росту содержания органического азота (табл. 2, рис. 3). В слое 0–10 см его концентрации по сравнению с расположенными ниже осадочными слоями возросли почти в 1,5 раза. Причиной этого является развитие аграрного сектора республики в последние два десятилетия и, соответственно, нарастание внешней биогенной, в первую очередь азотной, нагрузки. Соединения минерального азота обладают на порядок большей растворимостью и подвижностью в почвах по сравнению с фосфором, поэтому их приоритетный рост поступления в водоемы и депонирования в ДО выглядит вполне очевидным.

С ландшафтно-геохимических позиций поведение азота в системе «водосбор – озеро» также следовало за распределением ОВ (рис. 2). Его медианные концентрации в почвах, ДО литорали и профундали статистически не различались и были равны 0,20 %.

**Общий фосфор.** Содержание в ДО общего фосфора, как и органического азота, изменялось в широких пределах и обуславливало соответствующие показатели его вариабельности, достигающие двух порядков (табл. 1). Если исключить из расчетов экстремальные (более 2 %) значения, характерные только для оз. Когояр (Низменное Заволжье), питаемого болотными водами, то окажется, что 92 % измеренных концентраций  $P_{общ}$  в ДО озер ЧР укладываются в диапазон от 0,01 до 0,40 %.

Количественные вариации поступления и депонирования фосфора в водоемах ЧР служат отражением совокупности многообразных проявлений биотических и абиотических факторов зонального и азонального характера. Сравнение выборок данных по составу отложений озер Приволжской возвышенности и Низменного Заволжья не выявило достоверных различий между ними по содержанию  $P_{общ}$  (критерий Манна – Уитни,  $p = 0,56$ ), несмотря на то, что средние арифметические концентрации элемента отличались в 3,5 раза (табл. 1). Дело

в том, что при реализации алгоритма усреднения концентраций фосфора в системе «пространство (водоемы) – время (разновременные слои отложений)» фактически происходит нивелирование наблюдаемого размаха значений, при котором, в соответствии с законом больших чисел, существующие зональные особенности его накопления в ДО озер в пределах рассматриваемого региона сглаживаются. Так, в малопродуктивных озерах Приволжской возвышенности накопление фосфора в минеральных ДО обязано аллохтонным источникам, терригенным продуктам эрозии почв и пород. В зарастающих лесных озерах Заволжья основная доля фосфора, аккумулированного в составе отложений, связана с коллоидными гидроокислами железа и автохтонным ОВ.

Слабо проявляющаяся в зависимости от почвенно-биоклиматических, ландшафтно-географических особенностей территории и иных факторов дифференциация накопления фосфора в осадках озер Чувашии лежит в русле установленных ранее закономерностей его пространственного распределения в ДО озер Татарстана [Иванов, Зиганшин, 2006]. Здесь для водоемов таежно-лесной и лесостепной зон уровень  $P_{\text{общ}}$  в ДО также был однороден в физико-географическом отношении и характеризовался средней величиной 0,23 %.

В отношении фосфора также подтвержден квазистационарный характер его накопления в профиле ДО. Между выборками, объединяющими поверхностные и более древние осадки озер, статистически значимые ( $p < 0,05$ ) отличия по данному элементу отсутствовали (табл. 2). Исключение составили озера Ветлужско-Кокшагского района, где фосфора больше содержится в поверхностном слое (рис. 3). Причиной является рост продуктивности водоемов Низменного Заволжья, консервация фосфора в составе детритного ОВ и накопление железа в верхних слоях осадков. Ряд озер – Когояр, Астраханка, Большой и Малый Юлуксьер и др. – питаются болотными водами. Их отличает присутствие в воде Fe в форме гидроокислов, роль которых в процессах сорбции и осаждения ортофосфатов в природных водах хорошо известна, как и влияние на аккумуляцию фосфора в ДО [Мартынова, 2010]. Так, если в слое 10–100 см среднее содержание Fe было равно 0,61 %, то на современной стадии осадконакопления оно достигло 1,86 %. По-видимому, окислительно-восстановительные и кислотно-щелочные условия, складывающиеся в придонных горизонтах вод и контактирующих с ними отложениях озер провинции Низменного Заволжья, благоприятствуют удержанию

фосфора в илах в иммобилизованном состоянии. Снижение внутренней биогенной нагрузки, возникающий вследствие этого дефицит свободного фосфора в воде и конкурентные отношения с высшей водной растительностью за источники питания обуславливают довольно слабое развитие в большинстве озер Низменного Заволжья планктонных сообществ и их олиготрофный характер.

Следует подчеркнуть, что корреляционная связь между фосфором и железом была характерна для ДО не только озер Заволжья ( $r = 0,44$ ,  $p < 0,05$ ), но и водоемов Приволжской возвышенности ( $r = 0,28$ ,  $p < 0,05$ ), где Fe также играет важную роль в круговороте фосфора.

Радиальное распределение  $P_{\text{общ}}$  в сопряженных элементах ландшафтно-геохимической системы выглядит по-разному и зависит от рассматриваемого физико-географического региона (рис. 2). На территории Приволжской возвышенности его соотношение в ряду «почва – литораль – профундаль» равно 1 : 0,6 : 1, что подчеркивает связь накопления фосфора в ДО озер и почвах водосборных бассейнов через поступление с терригенным стоком. Между содержанием  $P_{\text{общ}}$  и частиц  $< 0,01$  мм в ДО озер Предволжья установлена значимая корреляция ( $r = 0,44$ ,  $p < 0,05$ ). В отложениях заволжских озер такая связь отсутствовала, что предполагает иные источники поступления фосфора в водоемы провинции. Здесь искомое отношение приобретает вид 1 : 0,2 : 0,8, свидетельствуя о слабом удерживании соединений фосфора в песках литоральной зоны и об относительной их аккумуляции в глубоких частях котловины с Fe-Mn-коллоидами и автохтонным ОВ. Обнаруживаемый «дефицит»  $P_{\text{общ}}$  в ДО литоральных участков озер связан не только с гранулометрическим составом покрывающих их отложений, но и с поглощением доступных форм фосфора водными и воздушно-водными растениями, образующими более или менее плотные пояса по периметру водоемов.

## Заключение

Озера Чувашской Республики характеризуются широким разнообразием минеральных и органических отложений, имеющих специфические черты в зависимости от генезиса, стадии развития озер и особенностей осадконакопления. В озерах провинции Приволжской возвышенности и региона в целом отмечено преобладание минеральных осадков, формирующихся за счет терригенного стока. Типологический спектр ДО по гранулометрическому составу также широк и изменяется от песков в лито-

ральной зоне озер до глинистых илов в наиболее глубоководных участках ложа. Группа органических осадков характерна для водоемов провинции Низменного Заволжья и Засурского полесского района смешанных лесов Предволжья, где представлена торфогенными и торфянистыми илами и отложениями из макрофитов.

Концентрации органического углерода и азота в ДО водоемов Низменного Заволжья составляют 15,8 и 1,22 %, в озерах Приволжской возвышенности – 3,3 и 0,13 % соответственно. Фосфор в равной мере накапливается в осадках водоемов северной и южной географических провинций Чувашии – 0,19 %.

Природные и антропогенные процессы, совокупно определяющие пространственную и временную динамику интенсивности поступления и накопления вещества в водоемах ЧР, отличает квазистационарный характер: содержание органического углерода, азота и фосфора в пределах верхней метровой осадочной толщи характеризуется относительно постоянной величиной.

Рост биологической продуктивности водоемов Низменного Заволжья ведет к изменению потоков азота и фосфора в направлении их аккумуляции в ДО и снижению внутренней биогенной нагрузки. Отмечаемое в большинстве озер Приволжской возвышенности увеличение концентрации азота в современных отложениях является проявлением нарастающей внешней биогенной нагрузки на водоемы, расположенные на аграрно освоенных территориях.

## Литература

Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1961. 491 с.

Белкина Н. А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 35–41.

ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.

ГОСТ 26107-84. Почвы. Методы определения общего азота.

## References

Arinushkina E. V. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv [Soil chemical analysis guide]. Moscow: MGU, 1961. 491 p.

Belkina N. A. Rol' donnykh otlozhenii v protsessakh transformatsii organicheskogo veshchestva i biogenykh elementov v ozernykh ekosistemakh [The role of sediments in the transformation of organic matter and biogenic elements in lake ecosystems]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2011. No. 4. P. 35–41.

ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества.

ГОСТ 26261-84. Почвы. Методы определения валового фосфора и валового калия.

Законнов В. В. Осадкообразование в водохранилищах Волжского каскада: Дис. ... докт. геогр. наук. М., 2007. 379 с.

Законнов В. В., Иванов Д. В., Законнова А. В., Кочеткова М. Ю., Маланин В. В., Хайдаров А. А. Пространственная и временная трансформация донных отложений в водохранилищах Средней Волги // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 3. С. 1–9.

Иванов Д. В., Зиганшин И. И. Органическое вещество и биогенные элементы в донных отложениях озер Республики Татарстан // Эколого-гидрологические проблемы изучения и использования водных ресурсов: Сб. науч. тр. междунар. конф. Казань, 2006. С. 169–172.

Иванов Д. В., Осмелкин Е. В., Зиганшин И. И. Исследование современного и исторического осадконакопления в водоемах Приволжской возвышенности и Низменного Заволжья // Труды КарНЦ РАН. 2018. № 9. С. 31–43. doi: 10.17076/lim844

Иванов Д. В., Шагидуллин Р. Р., Зиганшин И. И., Осмелкин Е. В. Взаимосвязь вещественного состава озерных отложений и антропогенного преобразования природных ландшафтов Республики Татарстан // Экология и промышленность России. 2011. № 6. С. 35–38.

Курдин В. П. О классификации и происхождении грунтов водохранилищ // Бюл. Ин-та биол. водохр. АН СССР. 1960. № 8–9. С. 57–61.

Мартынова М. В. Донные отложения как составляющая лимнических систем. М.: Наука, 2010. 243 с.

Новиков Б. И. Донные отложения днепровских водохранилищ. Киев: Наукова думка, 1985. 172 с.

Озера Среднего Поволжья. Л.: Наука, 1976. 236 с.

Осмелкин Е. В., Иванов Д. В., Зиганшин И. И. Характеристика гранулометрического состава донных отложений водоемов Предволжья Чувашской Республики // Российский журнал прикладной экологии. 2017. № 4. С. 11–15.

Россолимо Л. Л. Основы типизации озер и лимнологического районирования // Накопление вещества в озерах. М.: Наука, 1964. С. 5–46.

Физико-географическое районирование Среднего Поволжья / Под ред. А. В. Ступишина. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1964. 197 с.

Поступила в редакцию 09.03.2021

*Fiziko-geograficheskoe raionirovanie Srednego Povolzh'ya* [Physico-geographical zoning of the Middle Volga Region]. Ed. A. V. Stupishin. Kazan: Kazan university, 1964. 197 p.

ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава [Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution].

GOST 26107-84. Pochvy. Metody opredeleniya obshchego azota [Soils. Methods for determination of total nitrogen].

GOST 26213-91. Pochvy. Metody opredeleniya organicheskogo veshchestva [Soils. Methods for determination of organic matter].

GOST 26261-84. Pochvy. Metody opredeleniya valovogo fosfora i valovogo kaliya [Soils. Methods for determination of total phosphorus and total potassium].

Ivanov D. V., Osmelkin E. V., Ziganshin I. I. Issledovanie sovremennogo i istoricheskogo osadkonakopleniya v vodoemakh Privolzhskoi vozvysheynosti i Nizmen-nogo Zavolzh'ya [A study of contemporary and historical sedimentation in waterbodies of the Volga Upland and the Low-lying Trans-Volga Region]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRS RAS]. 2018. No. 9. P. 31–43. doi: 10.17076/lim844

Ivanov D. V., Shagidullin R. R., Ziganshin I. I., Osmelkin E. V. Vzaimosvyaz' veshchestvennogo sostava ozernykh otlozhenii i antropogennogo preobrazovaniya prirodnykh landshaftov Respubliki Tatarstan [Interrelation of the material composition of lake sediments and anthropogenic transformation of the natural landscapes of the Republic of Tatarstan]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia]. 2011. No. 6. P. 35–38.

Ivanov D. V., Ziganshin I. I. Organicheskoe veshchestvo i biogennye elementy v donnykh otlozheniyakh ozer Respubliki Tatarstan [Organic matter and biogenic elements in lake sediments of the Republic of Tatarstan]. *Ekologo-gidrol. probl. izucheniya i ispol'zovaniya vodnykh resursov*: Sb. nauch. tr. mezhdunar. konf. [Ecol. and hydrol. probl. of the study and use of water resources: Proceed. int. conf.]. Kazan, 2006. P. 169–172.

Kurdin V. P. O klassifikatsii i proiskhozhdenii gruntov vodokhranilishch [On the classification and origin of reservoir sediments]. *Byul. Inst. biol. vodokhr. AN SSSR*

[Bull. Inst. of Reservoir Biol. USSR Acad. Sci.]. 1960. No. 8–9. P. 57–61.

Martynova M. V. Donnye otlozheniya kak sostavlyayushchaya limnicheskikh system [Sediments as a component of limnic systems]. Moscow: Nauka, 2010. 243 p.

Novikov B. I. Donnye otlozheniya dneprovskikh vodokhranilishch [Sediments of the Dnieper reservoirs]. Kiev: Naukova dumka, 1985. 172 p.

Osmelkin E. V., Ivanov D. V., Ziganshin I. I. Kharakteristika granulometricheskogo sostava donnykh otlozhenii vodoemov Predvolzh'ya Chuvashskoi Respubliki [Sediments particle size characteristics of water bodies in the Volga Upland of the Chuvash Republic]. *Rossiiskii zhurn. priklad. ekol.* [Russ. J. Appl. Ecol.]. 2017. No. 4. P. 11–15.

Ozera Srednego Povolzh'ya [Lakes of the Middle Volga area]. Leningrad: Nauka, 1976. 236 p.

Rossolimo L. L. Osnovy tipizatsii ozer i limnologicheskogo raionirovaniya [Fundamentals of lakes typification and limnological zoning]. *Nakoplenie veshchestva v ozerakh* [Matter accumulation in lakes]. Moscow: Nauka, 1964. P. 5–46.

Zakonov V. V. Osadkoobrazovanie v vodokhranilishchakh Volzhskogo kaskada [Sedimentation in the Volga cascade reservoirs]: DSc (Dr. of Geogr.) thesis. Moscow, 2007. 379 p.

Zakonov V. V., Ivanov D. V., Zakonova A. V., Kochetkova M. Yu., Malanin V. V., Khaidarov A. A. Prostranstvennaya i vremennaya transformatsiya donnykh otlozhenii v vodokhranilishchakh Srednei Volgi [Spatial and temporal transformations of sediments in the Middle Volga reservoirs]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 2007. Vol. 34, no. 3. P. 1–9.

Received March 09, 2021

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Иванов Дмитрий Владимирович

заместитель директора по научной работе, к. б. н. Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420087  
эл. почта: water-rf@mail.ru  
тел.: (843) 2759573

### Осмелкин Евгений Витальевич

директор, к. г. н. Государственный природный заповедник «Присурский» пос. Лесной, 9, Чебоксары, Чувашская Республика, Россия, 428034  
эл. почта: pisurskij@mail.ru  
тел.: (8352) 414849

### Зиганшин Ирек Ильгизарович

старший научный сотрудник, к. г. н., доцент Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420087  
эл. почта: Irek\_Ziganshin@mail.ru  
тел.: (843) 2759573

## CONTRIBUTORS:

### Ivanov, Dmitry

Institute for Problems of Ecology and Subsoil Use, Tatarstan Academy of Sciences  
28 Daur'skaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia  
e-mail: water-rf@mail.ru  
tel.: (843) 2759573

### Osmelkin, Evgenii

Prisurskii State Strict Nature Reserve  
9 Lesnoi, 428034 Cheboksary, Chuvash Republic, Russia  
e-mail: pisurskij@mail.ru  
tel.: (8352) 414849

### Ziganshin, Irek

Institute for Problems of Ecology and Subsoil Use, Tatarstan Academy of Sciences  
28 Daur'skaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia  
e-mail: Irek\_Ziganshin@mail.ru  
tel.: (843) 2759573