

МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕКИ БУРЕЯ РАЙОНА НИЖНЕ-  
БУРЕЙСКОЙ ГЭС

*Г.В. Харитонова<sup>1</sup>, А.В. Остроухов<sup>1</sup>, Е.В. Уткина<sup>1</sup>, Н.С. Коновалова<sup>2</sup>, А.С. Стенина<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>ФГБУН Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 680000;  
e-mail: [gkharitonova@mail.ru](mailto:gkharitonova@mail.ru)

<sup>2</sup>ФГБУН Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 680000

<sup>3</sup>ФГБУН Институт биологии Коми НЦ УРО РАН, Коммунистическая 28, г. Сыктывкар, 167000

Поступила в редакцию 31 марта 2015 г.

Методами рентген-флуоресцентного анализа, лазерной дифрактометрии, растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа был изучен состав донных отложений р. Бурей и ее притоков в районе НБГЭС. Установлены крайне низкие содержания в них Cu и Ni, содержания остальных микроэлементов не превышают средних значений для осадочных пород. Показано, что микроэлементный состав донных отложений р. Бурей и ее притоков соответствует преобладающему типу пород их водосборного бассейна. Различия в составе донных отложений русла и зон аккумуляции статистически незначимы, что связано с преобладанием на исследуемой территории процессов физического выветривания.

**Ключевые слова:** донные отложения, микроэлементы, р. Бурей, Дальний Восток России.

#### ВВЕДЕНИЕ

При рассмотрении проблем экологического состояния природных и создаваемых экосистем большое значение имеют исследования компонентов, которые определяют процессы обмена с внешней средой. Наиболее динамичны эти взаимодействия в зоне современного седиментогенеза, к которым относятся донные отложения рек. Донные отложения поверхностных водотоков традиционно используются в качестве индикатора интенсивности и масштаба процессов накопления тех или иных загрязняющих веществ, в том числе и тяжелых металлов [19, 21].

Цель работы – исследование особенностей распределения микроэлементов в донных отложениях р. Бурей и ее притоков в районе Нижне-Бурейской ГЭС (НБГЭС). Работа является продолжением исследований авторами экосистемы р. Амур [10, 12–15]. Ранее было установлено, что содержание микроэлементов в донных отложениях р. Амур за исключением Zr не превышает их средних значений для осадочных пород. Однако в их тонкодисперсных фракциях отмечается более чем двукратное (по сравнению с осадочными породами) превышение концентраций Fe, Mn, Cu и Zn. В аккумуляции последних было показано участие диатомовых водорослей. В данной работе

основное внимание уделено генерализации данных микроэлементного состава донных отложений русла и зон аккумуляции р. Бурей и ее притоков. Также рассмотрено содержание микроэлементов в отдельных компонентах экосистемы р. Бурей (в эпилимне ее притоков).

#### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Работы проводились в среднем и нижнем течении р. Бурей, в зоне влияния Нижне-Бурейской ГЭС (рис. 1). Среднее течение реки имеет выраженный горный характер, большую часть его занимает водохранилище Бурейской ГЭС. На стыке предгорной и равнинной части идет строительство плотины Нижне-Бурейской ГЭС (89 км от устья). Водоохранилище строящейся ГЭС распространится до плотины Бурейской ГЭС. Его наибольшая ширина составит 5 км, площадь акватории – 153.3 км<sup>2</sup>, средняя глубина – 13 м, полный и полезный объем – 2034 и 77 млн м<sup>3</sup>, соответственно. Сток Бурейской ГЭС через Нижне-Бурейское водохранилище будет проходить транзитом без стратификации. В зависимости от водности года период водного обмена составит от 20 до 45 суток [5].

Бурей и ее притоки по водному режиму относятся к дальневосточному типу. Основным источником



Таблица 1. Гидрологическая характеристика притоков р. Буряя в районе Нижне-Бурейской ГЭС.

Река	Длина, км	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Среднего-летний годовой сток, м <sup>3</sup> /с	Падение реки, м/км	Минерализация воды, мг/дм <sup>3</sup>
Буряя	623	707000	900	–	30–80
Синель	33	–	2.69	4.96	до 60
Пайканчик	12	–	0.66	8.50	до 94
Большие Симичи	38	–	1.64	3.29	до 60
Малые Симичи	11	–	0.19	8.18	до 180
Дея	37	440	4.14	1.84	до 60
Дикан	125	841	–	–	–

Примечание. Прочерк – данные отсутствуют.

представлена равнинными ландшафтами с высотами 200–250 м. Это пологие, холмистые и холмисто-увалистые равнины на интрузивных, вулканических и осадочных породах. На северо-восточном участке распространены денудационные глыбовые предгорья (холмогорья) с высотами 300–350 м.

Климат территории резко континентальный с муссонными чертами. Зимой преобладает ясная и морозная погода при затишьях и слабых ветрах, весна солнечная и сухая. Летом скорости ветра, облачность, влажность и количество выпадающих осадков увеличиваются. Средняя годовая температура воздуха составляет 2.2°. Самый холодный месяц январь со средней температурой -30.1°. Абсолютный минимум температуры достигает -52°. Самый теплый месяц июль с абсолютным максимумом в 41°. Переход средней суточной температуры воздуха через нуль градусов происходит осенью в двадцатых числах октября, весной – в десятых числах апреля. Продолжительность безморозного периода составляет 190 дней. Годовое количество осадков в районе Нижне-Бурейского водохранилища колеблется от 562 (с. Каменка) до 718 мм (с. Пайкан), из них 82 % выпадает за май–октябрь [5]. Большое количество дней со средне-суточной температурой ниже нуля градусов, низкие зимние температуры, наличие островной мерзлоты и относительно невысокое количество осадков определяют преобладание на рассматриваемой территории процессов физического выветривания при дезинтеграции горных пород.

Объектом изучения явились донные отложения русла (ДО) и зон аккумуляции (наилки) р. Буряя и ее притоков – рек Синель, Пайканчик, Большие и Малые Симичи, Дея, Дикан. Отбор проб донных отложений проводили на участке от пос. Талакан до пос. Новобурейский (рис. 1). Дополнительно были отобраны единичные пробы намывтого берегового песка (БП) и эпилитона (водоросли обрастания гра-

вино-галечного субстрата). Всего было отобрано 48 образцов.

В основу исследования положен валовой анализ состава макро- и микроэлементов воздушно-сухих образцов, который проводили рентген-флуоресцентным методом (Pioneer S4, Bruker AXS, Германия) (ИВЭП ДВО РАН). Определение валового состава образцов было дополнено лазерно-дифрактометрическими и электронно-микроскопическими исследованиями (РЭМ анализ). РЭМ анализ проводили на растровом электронном микроскопе VEGA 3 LMH (TESCAN, Чешская Республика) (Аналитический центр ИТиГ ДВО РАН). Для съемки образцы (предварительно растерты и просеяны через сито 2 мм) были подготовлены методом просыпки, напылением Pt, увеличением до 20000. Для анализа фаз с высоким атомным числом дополнительно к детектору вторичных электронов (SE-детектор) был использован детектор обратно рассеянных электронов (BS-детектор). При получении изображений с помощью BS-детектора фазы с высоким средним атомным числом отражаются в контрасте более ярко по сравнению с фазами с меньшим атомным числом. Для анализа элементного состава наиболее репрезентативных участков использовали энергодисперсионный спектрометр “X-Max 80”, Oxford, Великобритания (РСМА анализ). Лазерную дифрактометрию образцов проводили на дифрактометре SALD-2300 (SHIMADZU, Япония) (ИВЭП ДВО РАН).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристику микроэлементного состава донных отложений предварим анализом данных их макроэлементного состава, поскольку они позволяют получить предварительную оценку способности отложений накапливать те или иные микроэлементы. Для большинства отложений их содержание в значительной степени зависит от валового состава и дисперсно-

сти. Чем меньше в составе отложений  $\text{SiO}_2$  и больше относительное содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , тем выше их дисперсность, больше тонкодисперсных фракций и в том числе глинистых минералов, сорбирующих большую часть микроэлементов [10, 23–25].

Анализ данных валового состава (табл. 2, 3) с этих позиций позволил выявить важные особенности содержания и распределения микроэлементов в донных отложениях района Нижне-Бурейской ГЭС. Во-первых, отмечается тенденция увеличения содержания микроэлементов в ряду “намытый береговой песок – донные отложения русла – донные отложения зон аккумуляции (наилки) – эпилитон”. Во-вторых, состав донных отложений (содержания макро- и микроэлементов) четко соответствует генезису пород водосборного бассейна конкретного водного объекта.

Распределение микроэлементов в системе “намытый береговой песок – донные отложения русла – донные отложения зон аккумуляции (наилки) – эпилитон” связано с валовым составом отдельных членов ряда. Малое содержание микроэлементов в береговом песке обусловлено его преимущественно кварц-полевошпатовым составом и низким содержанием  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  по сравнению с остальными членами ряда [3]. Так, на станции р. Синель содержание  $\text{SiO}_2$  в ряду падает с 82 до 67 %, содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  наоборот возрастает с 0.4 до 3.9 %. Близкая картина при меньших абсолютных содержаниях  $\text{SiO}_2$  наблюдается и для р. Дикан (станция 7). Повышенное содержание микроэлементов в эпилитоне, как нами было показано ранее для экосистемы р. Амур [10, 12], связано с высоким содержанием в нем диатомовых водорослей. Согласно РЭМ-анализу, в эпилитоне р. Синель они представлены главным образом пенистыми диатомеями из родов *Flagilaria*, *Navicula* и *Ulnaria* (рис. 2). Повышенные содержания в них Fe, Mn, Co, Zn и Sr обусловлены особенностями биохимии развития пенистых диатомовых водорослей [4, 16–18]. О причинах существенно более высоких концентраций в эпилитоне Zr остановимся ниже.

Донные отложения русла (ДО) и зон аккумуляции (наилки) по содержанию  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и микроэлементов занимают промежуточное положение. Причем наилки по этим параметрам ближе к эпилитону, чем ДО. Последнее связано с условиями их отложения в зонах аккумуляции и, соответственно, с большей дисперсностью, о чем свидетельствуют данные анализа распределения частиц по размерам (рис. 3). Состав наилок определяется тремя фракциями – средняя пыль (5–10 мкм), мелкий и средний песок (50–250 и 250–500 мкм, соответственно). Из них основными являются фракции мелкого ( $\geq 50$  %) и среднего ( $\geq 25$  %) песка [1, 22]. ДО значительно более отсортированы и

представлены практически полностью (до 80 % и более) фракцией крупного песка (500–1000 мкм).

Однако сравнительная статистическая оценка валового состава ДО и наилок показала, что разность их микроэлементного состава при доверительной вероятности 95 % статистически не значима. Следовательно, увеличение содержания микроэлементов в наилках можно отметить лишь как тенденцию. Оценку проводили на основании расчетных критических значений  $\Delta$  для отрицания нуль-гипотезы равенства данных отдельных выборок. Критическое значение для отрицания нуль-гипотезы определяется по следующей формуле:  $\Delta = \pm ts \sqrt{(n_1 + n_2) / n_1 n_2}$ , где  $t$  – критерий Стьюдента при заданной доверительной вероятности,  $s$  – стандартное отклонение,  $n_1$  и  $n_2$  – число определений [11]. Разность средних значений содержания элементов оказалась меньше расчетных значений  $\Delta$ . Исключение составил Zr, содержание которого в наилках по сравнению с ДО русла значимо выше, причины чего будут рассмотрены ниже. Причиной же статистической незначимой разности состава ДО и наилок, по нашему мнению, является преобладание на исследуемой территории процессов физического выветривания при дезинтеграции горных пород. Об этом свидетельствуют и данные распределения частиц по размерам: содержание в наилках тонкодисперсных фракций <10 мкм не превышает 2 %. Выветривание происходит в основном до фракции мелкого песка (50–250 мкм).

Дополнительные РЭМ- и РСМА-анализ (рис. 4) показали, что в составе донных отложений слоистых минералов мало. Основой их минералогического состава являются каркасные минералы – кварц и полевые шпаты. Последние представлены, главным образом, слабо окатанными зернами и осколочными обломками неправильной формы с преобладанием зерен с хорошо сохранившимися кристаллографическими формами. Большая степень выветрелости зерен характерна для Na-полевых шпатов, что соответствует ряду устойчивости минералов S.S. Goldich [20].

Следует отметить, что РЭМ-анализ и лазерная дифрактометрия позволили установить причину достаточно неожиданного накопления Zr в наилках и эпилитоне по сравнению с ДО (рис. 5). В донных отложениях был обнаружен циркон  $\text{ZrSiO}_4$ . РСМА-анализ показал, что это циркон без примесей с идеальной формулой  $\text{ZrSiO}_4$  (отношение Zr:Si~1:1). Он встречается как в виде включений практически идиоморфных кристаллов в зернах слабо устойчивых к физическому выветриванию Na-полевых шпатов (рис. 4 а, б), так и отдельных несколько выветрелых кристаллов (рис. 5 а). Их размер соответствует размеру ча-

Таблица 2. Валовой состав донных отложений р. Бурея и ее притоков в районах распространения интрузивных (I), эффузивных (II) и осадочных пород (III), %.

Район	Номер и положение станций отбора	Объект	n	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S
I	1 пос. Талакан	ДО	2	71.21	0.22	12.68	1.37	0.04	1.35	0.28	3.95	3.78	0.08	0.01
	2 р. Синель	БП	2	81.95	0.08	9.82	0.45	0.02	0.40	0.07	1.83	4.38	0.02	0.00
		ДО	2	71.18	0.28	12.00	1.55	0.04	1.19	0.39	2.68	3.74	0.08	0.01
		Наилки	2	65.46	0.37	11.43	2.22	0.09	1.51	0.53	2.66	3.55	0.14	0.03
		Эпилитон	2	67.06	0.40	10.18	3.91	0.75	1.49	0.48	2.31	3.21	0.17	0.05
	3 р. Пайканчик	ДО	7	71.19	0.31	11.20	2.01	0.07	1.00	0.28	2.42	3.80	0.09	0.04
II		Наилки	1	62.02	0.47	12.96	3.57	0.10	2.07	0.68	3.80	2.96	0.17	0.03
		Эпилитон	1	67.77	0.40	11.78	2.16	0.12	1.44	0.34	3.04	3.99	0.13	0.04
	4 р. Б. Симичи	ДО	5	66.20	0.33	10.96	2.47	0.11	0.79	0.34	1.95	3.71	0.13	0.06
	5 р. М Симичи	ДО	3	78.99	0.25	8.54	1.87	0.10	0.60	0.31	1.49	2.69	0.09	0.05
	6 р. Дея	ДО	1	86.26	0.07	7.44	0.65	0.04	0.14	0.05	0.91	4.17	0.03	0.01
		Наилки	3	76.78	0.26	8.90	1.53	0.06	0.38	0.18	1.39	3.78	0.09	0.04
III		Эпилитон	1	69.20	0.38	10.33	4.59	0.13	0.75	0.32	1.57	3.49	0.25	0.07
	7 р. Дикан	БП	1	64.62	0.29	12.45	2.65	0.13	1.53	0.48	3.84	3.73	0.12	0.02
		ДО	2	60.73	0.50	12.70	3.31	0.11	2.00	0.82	3.93	3.21	0.17	0.02
		Наилки	2	57.97	0.67	13.17	4.27	0.16	2.23	1.08	3.65	2.85	0.21	0.06
		Эпилитон	1	57.27	0.80	12.66	5.82	0.24	3.47	1.61	3.59	2.20	0.31	0.10
	8 р. Бурея. выше НБГЭС	ДО	2	59.08	0.58	13.35	3.93	0.10	2.15	1.19	3.44	3.23	0.19	0.03
9 пос. Новобурейский	ДО	4	76.77	0.25	10.08	1.90	0.10	0.91	0.53	2.34	3.33	0.08	0.02	
	Наилки	1	64.35	0.44	12.52	3.60	0.24	1.47	1.06	3.12	3.14	0.18	0.05	
10 Николаевский перекат	Наилки	3	65.99	0.38	12.50	2.95	0.17	1.49	0.93	3.37	3.23	0.12	0.02	

Примечание. ДО – донные отложения. БП – береговой песок, n – число проанализированных образцов.

Таблица 3. Микроэлементный состав донных отложений р. Бурея и ее притоков в районах распространения интрузивных (I), эффузивных (II) и осадочных пород (III), мг/кг.

Район	Номер и положение станций отбора	Объект	n	Cr	Cu	Zn	Pb	Co	Ni	Sr	V	Rb	Zr	Y	Yb	
I	1 пос. Талакан	ДО	2	14	0	36	28	13	0	320	8	131	204	11	10	
	2 р. Синель	БП	2	9	0	22	34	12	0	99	2	168	123	13	15	
II		ДО	2	17	2	39	28	16	3	253	15	144	204	16	9	
	3 р. Пайканчик	Наилки	2	20	6	43	26	16	4	290	18	135	300	19	11	
		Эпилитон	2	29	3	39	25	27	5	231	24	112	314	21	6	
		ДО	7	18	2	33	27	16	1	239	15	126	229	15	9	
		Наилки	1	27	4	54	22	17	3	303	28	101	386	21	5	
		Эпилитон	1	15	2	29	25	15	0	289	13	125	492	18	8	
		ДО	5	21	7	36	26	17	6	205	15	147	219	21	8	
		ДО	3	27	0	35	35	16	1	101	11	109	195	10	11	
		ДО	1	11	0	19	36	15	0	60	1	145	126	10	14	
		Наилки	3	17	0*	31	32	14	0	115	6	139	306	15	10	
III		Эпилитон	1	32	8	40	27	25	5	155	18	119	316	21	5	
	7 р. Дикан	БП	1	19	1	45	24	20	4	359	12	138	204	17	6	
ОП		ДО	2	26	4	45	21	17	4	364	30	115	255	22	5	
	8 р. Бурея, выше НБГЭС	ДО	2	30	10	78	20	18	8	330	39	126	282	24	5	
	9 пос. Новобурейский	ДО	4	23	2	48	32	18	2	131	16	134	221	17	12	
		Наилки	1	32	8	81	25	18	9	212	35	131	283	26	7	
	10 Николаевский пережат	Наилки	3	28	4	65	26	15	6	208	26	137	250	23	7	
				100	57	80	20	20	20	95	450	130	200	200	30	3

Примечание. ДО – донные отложения. БП – береговой песок, n – число проанализированных образцов, ОП – средние содержания микроэлементов в осадочных породах [2].  
\* – для единственного образца с правого берега было отмечено 108 мг/кг.

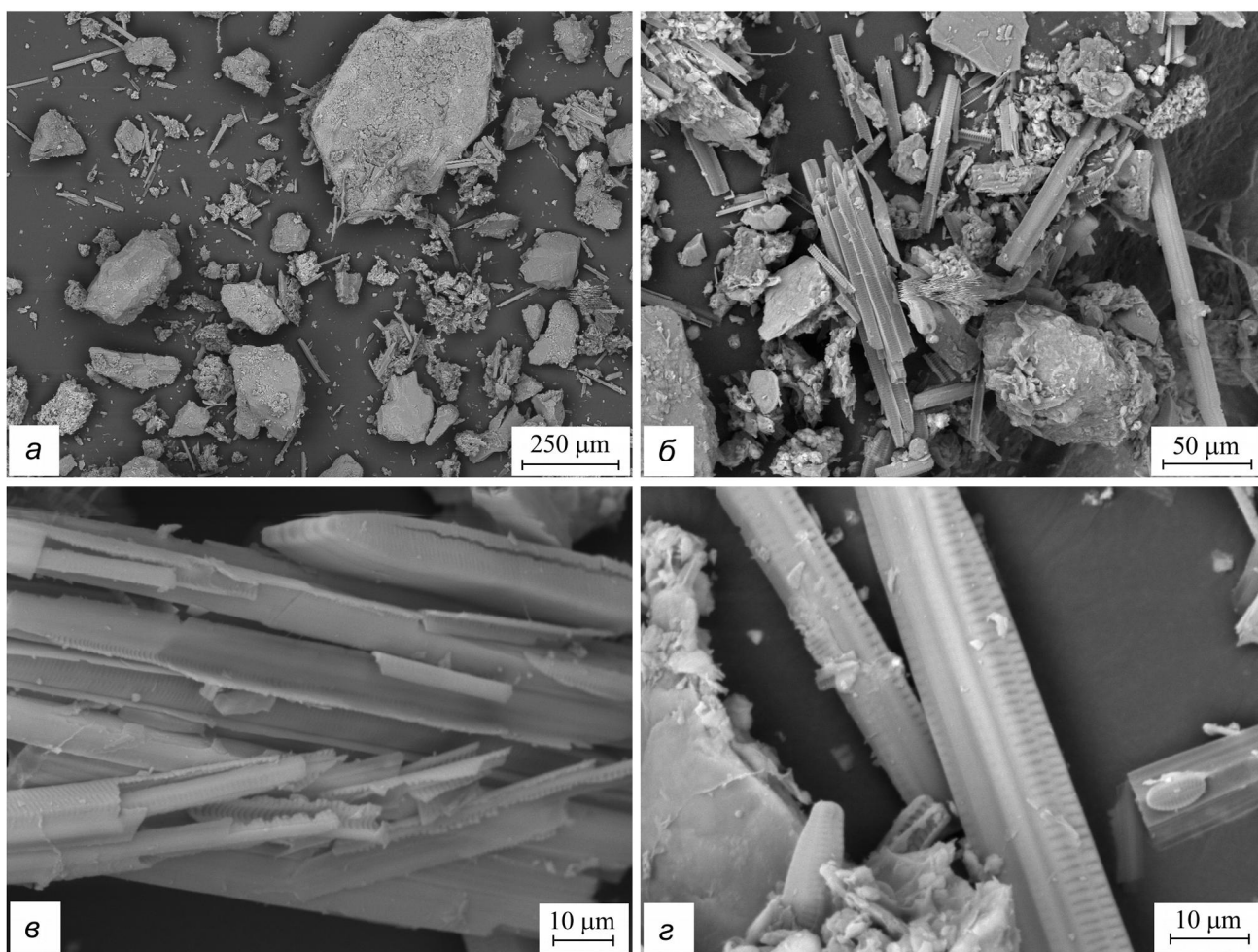


Рис. 2. Микрофотографии эпилитона р. Синель.

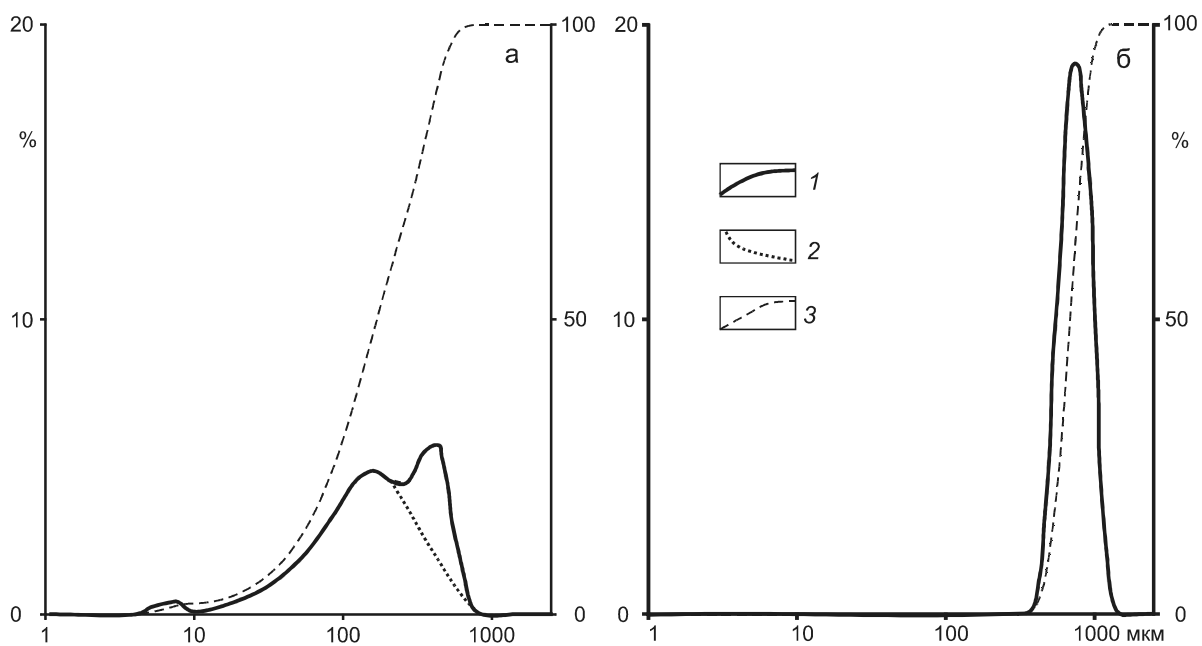
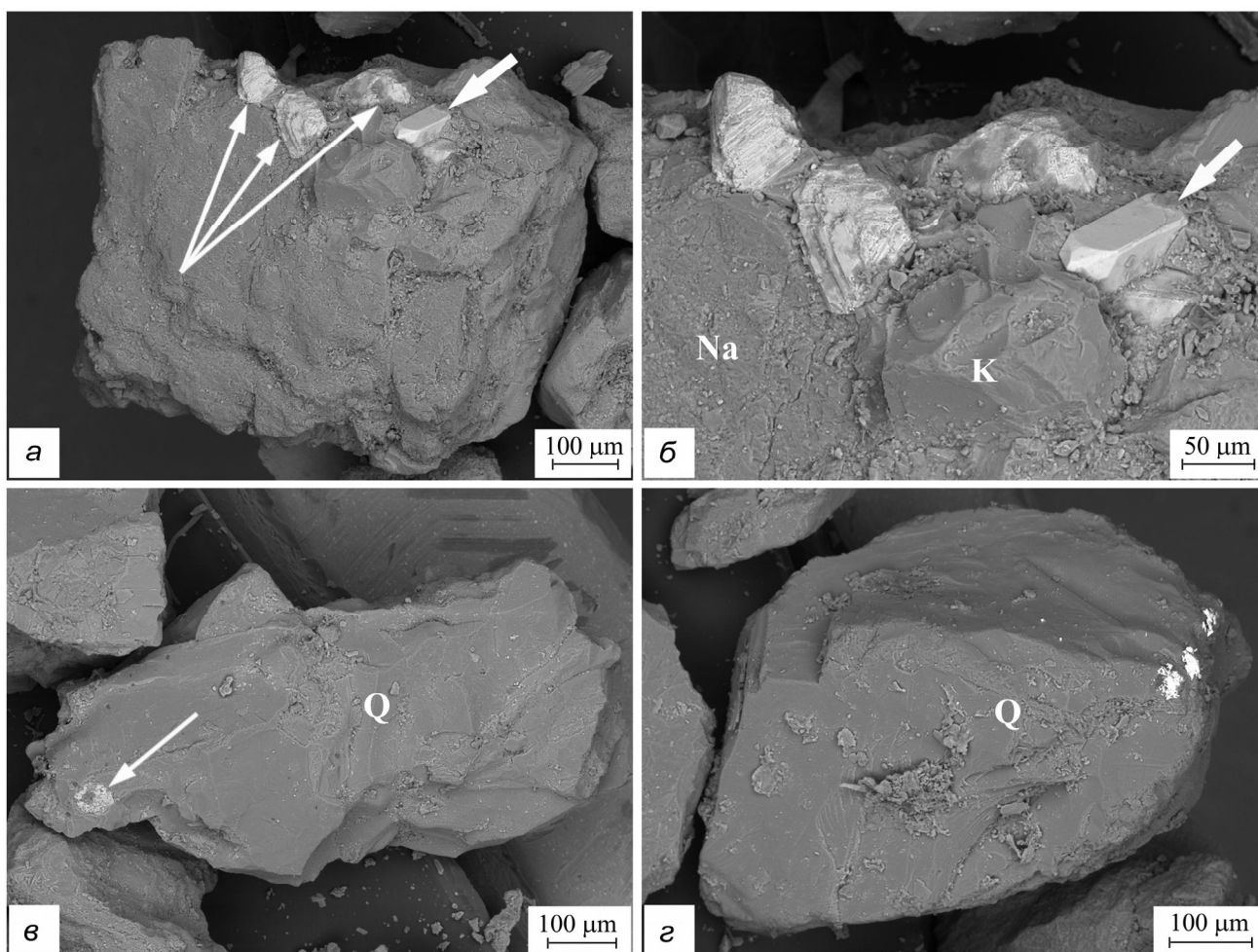


Рис. 3. Распределение частиц по размерам в наилках (а) и донных отложениях (б) р. Синель.

1 – дифференциальные кривые; 2 – дополнительные построения, позволяющие оценить относительное содержание фракции мелкого песка; 3 – интегральные кривые.



**Рис. 4.** Микрофотографии зерен полевых шпатов (а, б) и кварца (в, г). Q – кварц; Na, К – Na-, К-полевые шпаты, донные отложения р. Синель. Тонкими стрелками показаны оксиды железа, толстой стрелкой – циркон (РЭМ).

стиц мелкого песка 50–250 мкм – основной фракции наилков. Поскольку плотность циркона существенно выше плотности кварца и полевых шпатов (4.68–4.71 и 2.51–2.75 г/см<sup>3</sup>, соответственно), при уменьшении скорости течения Буреи и ее притоков в зонах аккумуляции происходит осаждение минерала и, соответственно, увеличение концентрации Zr по сравнению с ДО. Причина повышенных концентраций Zr в эпиплите близкая – кристаллы минерала механически задерживаются водорослями обрастания гравийно-галечного субстрата.

Из аксессуарных минералов, содержание которых менее одного процента, методами РЭМ и РСМА анализа дополнительно были диагностированы сфен  $\text{CaTiSiO}_5$  (рис. 5 б), смешанные фосфаты редкоземельных элементов (Ce, La, Nd, Pr, Sm, Gd) (рис. 5 в) и фторапатит  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$  (рис. 5 г). Кроме того на зернах кварца были зафиксированы скопления микрочастиц

платины размером до 20 мкм (рис. 4 г). На поверхности зерен Na-полевого шпата были обнаружены выделения оксидов железа (неустановленного состава) в виде окристаллизованных форм размером до 100 мкм (рис. 4 а), в виде более мелких коллоидных форм они встречаются на поверхности зерен кварца (рис. 4 в).

Рассмотрим изменения состава донных отложений территории в зависимости от генетического типа подстилающих горных пород. Так, состав ДО района распространения интрузивных пород (район I, станции отбора 1–4: р. Бурея, п. Талакан; притоки Синель, Пайканчик, Большие Симичи) по сравнению с районом распространения вулканических пород (район II, станции отбора 5, 6: притоки Малые Симичи, Дея) характеризуется существенно меньшим содержанием  $\text{SiO}_2$  – 62–71 и 77–86%, соответственно. При этом состав ДО района I характеризуется существенно более



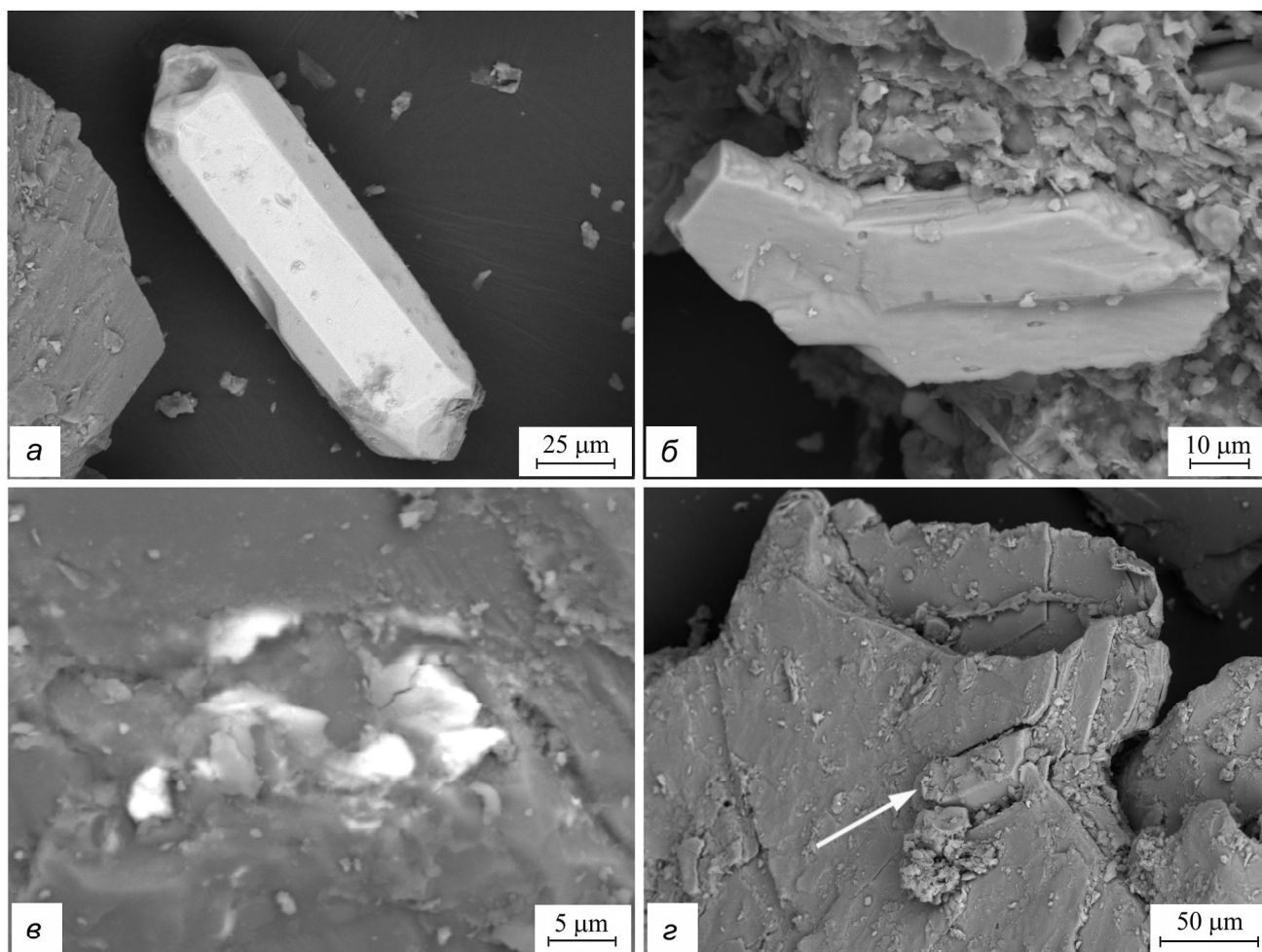


Рис. 5. Микрофотографии зерен циркона (а), сфена (б), смешанных фосфатов РЗЭ (в) и фторапатита (г, стрелка), донные отложения р. Синель (РЭМ).

высокими содержаниями  $\text{CaO}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  (Na-Ca-полевые шпаты) по сравнению с районом II. Если в ДО района I содержание  $\text{CaO}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  составляет 0.8–2.1 и 2.0–4.0%, соответственно, то содержание таковых в районе II не превышает 0.6 и 1.5%, соответственно.

По сравнению с районом I ДО района распространения осадочных пород (район III, станции 7–10: р. Дикан; р. Буря, выше плотины НБГЭС, пос. Новобурейский, Николаевский пережат) при близком содержании  $\text{SiO}_2$  характеризуются накоплением  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  – 10.1–13.4, 1.9–4.3, 0.9–2.2 и 2.3–3.9% соответственно.

Содержания микроэлементов (табл. 3), за исключением Pb и Zr, в донных отложениях независимо от генетического типа пород водосборного бассейна не превышают их средних значений для осадочных пород по А.П. Виноградову [2]. Несколько повышенные содержания Pb в 22–41 мг/кг и Zr в 200–420 соответ-

ствуют их содержанию для бассейна р. Амур в целом [10]. В ДО отмечается крайне низкое содержание Cu, Ni и V (0–4, 0–6 и 8–31 мг/кг, соответственно). Следует отметить, что для микро-, как и для макроэлементного состава ДО отмечается тенденция соответствия составу и генезису пород водосборного бассейна конкретного водного объекта. Так минимальными содержаниями Sr (элемента, парагенетичного Ca) в 40–90 мг/кг характеризуются ДО района распространения вулканических пород. Максимальным накоплением микроэлементов характеризуется район осадочных пород. При этом если содержания Co и Zn приближаются к средним для осадочных пород значениям, то содержания Sr и V остаются низкими, Cu и Ni крайне низкими – 27–28 и 5–6 мг/кг, соответственно.

Генерализация данных валового состава донных отложений и статистический анализ полученных результатов позволили подтвердить первоначальный

вывод о соответствии состава макроэлементов ДО составу и генезису пород водосборного бассейна (табл. 4). Так, ДО районов распространения интрузивных и осадочных пород (районы I и III) статистически значимо отличаются от таковых района эффузивных пород (район II) существенно меньшим содержанием  $\text{SiO}_2$  и повышенным содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{MgO}$ . Кроме того, для последней пары  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{MgO}$  отмечается значимое накопление в ДО района III по сравнению с районом I.

В ряду микроэлементов статистическая значимость однонаправленных различий в содержании установлена для микроэлементов, парагенетичных макроэлементам  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$  и  $\text{P}$  –  $\text{Sr}$ ,  $\text{Zn}$  и  $\text{V}$  (табл. 5). При этом максимальные различия наблюдаются для  $\text{Sr}$ . Так, содержание  $\text{Sr}$  значимо выше в районах I и III, чем в районе II. Разность средних и в том, и в другом случае составляет 150 мг/кг. Основное накопление  $\text{Zn}$  и  $\text{V}$  происходит в районе распространения осадочных пород. Отмечается также статистически значимое накопление в этом районе  $\text{Sr}$  и  $\text{Ni}$  при крайне низком их содержании по сравнению с осадочными породами. Следует также отметить роль эпилитона в накоплении вместе с  $\text{Fe}$  этих же микроэлементов  $\text{Sr}$ ,  $\text{Zn}$  и  $\text{V}$ . Так в районе распространения осадочных пород содержание  $\text{Sr}$  и  $\text{Zn}$  в эпилитоне достигает средних для осадочных пород значений. Содержание  $\text{V}$  также уве-

личивается, но существенно меньше – лишь до половины этой величины.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Микроэлементный состав донных отложений р. Бурья и ее притоков в районе Нижне-Бурейской ГЭС характеризуется крайне низким содержанием  $\text{Cu}$  и  $\text{Ni}$ , содержания остальных микроэлементов не превышают средних значений в осадочных породах. Исключение составляют  $\text{Pb}$  и  $\text{Zr}$ , что связано с геохимическими особенностями бассейна.

Для исследуемой территории отмечается тенденция увеличения содержания микроэлементов в ряду “намытый береговой песок – донные отложения русла – донные отложения зон аккумуляции (наилки) – эпилитон”, что связано с разностью их валового состава и дисперсности. Малое содержание микроэлементов в намытом береговом песке обусловлено его невысокой дисперсностью и преимущественно кварц-полевошпатовым составом. Повышенное содержание  $\text{Fe}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Zn}$  и  $\text{Co}$  в эпилитоне определяется высоким содержанием в нем диатомовых водорослей (пеннатные диатомеи из родов *Flagilaria*, *Navicula* и *Ulnaria*) и биохимическими особенностями их развития и функционирования.

Вследствие преобладания на исследуемой территории процессов физического выветривания различия

Таблица 4. Сравнительная статистическая оценка содержания макроэлементов в донных отложениях р. Бурья в районах распространения интрузивных (I), эффузивных (II) и осадочных пород (III), %.

Показатель	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MnO}$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	S
I <sub>19</sub>	68.8	0.3	11.5	2.1	0.1	1.1**	0.4	2.6	3.7	0.11	0.04
II <sub>7</sub>	79.1	0.2	8.5	1.5	0.1	0.4	0.2	1.4	3.4	0.08	0.04
III <sub>14</sub>	66.1	0.4	12.1	3.1	0.1	1.6	0.9	3.2	3.2	0.14	0.03
ЭI <sub>3</sub>	67.3	0.4	10.7	3.3	0.5	1.5	0.4	2.6	3.5	0.16	0.05
ЭII <sub>1</sub>	69.2	0.4	10.3	4.6	0.1	0.8	0.3	1.6	3.5	0.25	0.07
ЭIII <sub>1</sub>	57.3	0.8	12.7	5.8	0.2	3.5	1.6	3.6	2.2	0.31	0.10
s	6.6	0.1	1.4	1.0	0.1	0.4	0.2	0.6	0.6	0.05	0.02
I–II	-10.3*	0.1	3.0*	0.6	0.0	0.7*	0.1	1.2*	0.3	0.03	0.00
$\Delta_{I,II}$	5.7	0.1	1.2	0.9	0.1	0.3	0.2	0.5	0.5	0.04	0.02
III–II	-13.0*	0.2	3.5*	1.5*	0.1	1.2*	0.6*	1.8*	-0.2	0.06*	-0.01
$\Delta_{III,II}$	6.0	0.1	1.3	0.9	0.1	0.3	0.2	0.5	0.5	0.04	0.02
III–I	-2.7	0.1	0.6	1.0*	0.1	0.5*	0.5*	0.6*	-0.5*	0.03	0.01
$\Delta_{III,I}$	4.6	0.1	1.0	0.7	0.1	0.2	0.1	0.4	0.4	0.03	0.02

Примечание. I, II, III и ЭI, ЭII, ЭIII – средние значения содержаний макроэлементов в ДО и эпилитоне соответствующих районов опробования, нижний индекс – число проанализированных образцов; s – стандартное отклонение;  $\Delta$  – критическое значение для отрицания нуль-гипотезы равенства средних отдельных выборок, \* – статистически значимая разность, \*\* – статистически значимое превышение содержания в наилках по сравнению с ДО.

**Таблица 5. Сравнительная статистическая оценка содержания микроэлементов в донных отложениях р. Бурея и ее притоков в районах распространения интрузивных (I), эффузивных (II) и осадочных пород (III), мг/кг.**

Показатель	Cr	Cu	Zn	Pb	Co	Ni	Sr	V	Rb	Zr	Y	Yb
ОП	100	57	80	20	20	95	450	130	200	200	30	3
I <sub>19</sub>	19	4	37	27	16	3	249	15	134	237**	17	9
II <sub>7</sub>	20	0	31	34	15	0	101	7	127	233**	12	11
III <sub>14</sub>	28	5	61	25	18	6	250	27	129	273**	22	7
ЭI <sub>3</sub>	24	3	36	25	23	3	251	20	116	373	20	6
ЭII <sub>1</sub>	32	8	40	27	25	5	155	18	119	316	21	5
ЭIII <sub>1</sub>	44	14	75	20	29	9	468	64	81	382	25	3
s	9	14	13	4	4	3	63	9	15	91	5	2
I – II	-1	4	6	-7*	1	3	148*	8	7	4	5*	-2
Δ <sub>I,II</sub>	7	12	11	3	4	3	55	8	13	79	4	2
III – II	8	5	31*	-8*	3	5	149*	20*	2	41	10*	-4*
Δ <sub>III,II</sub>	8	12	12	3	4	3	58	8	14	82	5	2
III – I	9*	2	25*	-1	2	3*	1	12*	-5	37	6*	-1
Δ <sub>III,I</sub>	6	9	9	3	3	2	44	6	10	63	4	2

*Примечание.* I, II, III и ЭI, ЭII, ЭIII – средние значения содержаний микроэлементов в ДО и эпилитоне соответствующих районов опробования, нижний индекс – число проанализированных образцов; s – стандартное отклонение; ОП – средние содержания микроэлементов в осадочных породах, по А.П. Виноградову [2], Δ – критическое значение для отрицания нуль-гипотезы равенства средних отдельных выборок, \* – статистически значимая разность, \*\* – статистически значимое превышение содержания в наилках по сравнению с ДО.

в составе донных отложений русла и зон аккумуляции имеют характер тенденции и за исключением Zr статистически незначимы. Накопление Zr в наилках по сравнению с донными отложениями русла связано с высвобождением при выветривании Na-полевых шпатов кристаллов-включений ZrSiO<sub>4</sub> – циркона, основного минерала циркония. Их повышенная плотность и размер, соответствующий размеру преобладающей фракции наилок, способствуют осаждению кристаллов минерала при уменьшении скорости течения в зонах аккумуляции.

Микроэлементный состав донных отложений р. Бурея и ее притоков соответствует преобладающему типу подстилающих пород их водосборного бассейна. Донные отложения районов преимущественного распространения интрузивных и осадочных пород отличаются от таковых района эффузивных пород повышенным содержанием Sr, Zn и V. Для пары Zn и V отмечено дополнительное накопление в районе осадочных пород.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 202 с.
- Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
- Водяницкий Ю.Н., Добровольский В.В. Железистые минералы и тяжелые металлы в почвах. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева РАСХН, 1998. 216 с.
- Заварзин Г.А. Лекции по природоведческой микробиологии. М.: Наука, 2004. 348 с.
- Заключительный отчет по реализации программы мониторинга водного объекта на период строительства, включая мероприятия по снижению негативного воздействия (водный блок), Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2014. 197 с.
- Исаченко А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа, 1991. 366 с.
- Мордовин А.М. Годовой и сезонный сток рек бассейна Амура: препринт. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 1996. 72 с.
- Мордовин А.М., Шестеркин В.П., Антонов А.Л. Река Бурея: гидрология, гидрохимия и ихтиофауна. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2006. 149 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 18. Дальний Восток. Вып. 1. Верхний и Средний Амур. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 780 с.
- Сиротский С.Е., Харитонов Г.В., Ким В.И., Климин М.А., Чижикова Н.П., Тюгай З., Коновалова Н.С., Уткина Е.В. Гранулометрический и микроэлементный состав донных отложений реки Амур в среднем и нижнем течении // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33. №3. С. 88–98.
- Скуг Д., Уэст Д. Основы аналитической химии М.: Мир, 1979. Т. 1. 480 с.
- Харитонов Г.В., Сиротский С.Е., Чижикова Н.П., Коновалова Н.С., Манучаров А.С., Тюгай З.Н., Уткина Е.В. Ми-

- кроэлементы во фракциях донных отложений р. Амур // Литология и полезные ископаемые. 2014. № 3. 207–219.
13. Чижикова Н.П., Харитонов Г.В., Матюшкина Л.А., Сиротский С.Е. Минералогический состав тонкодисперсной части почв среднего и нижнего Приамурья, донных отложений и взвесей реки Амур // Почвоведение. 2004. № 8. С. 1000–1012.
  14. Чижикова Н.П., Сиротский С.Е., Харитонов Г.В., Манучаров А.С., Коновалова Н.С., Уткина Е.В. Минералогический и химический состав тонкодисперсной части донных отложений р. Амур // Почвоведение. 2011. № 7. С. 848–860.
  15. Шалдыбин М.В., О.К. Кирилук О.К., Дембовецкий А.В., Лопушняк Ю.М., Коновалова Н.С., Уткина Е.В., Харитонova Г.В. Минералогический состав почв бугров Бэра Даурии // Тихоокеан. геология. 2014. Т. 33, №6. С. 111–126.
  16. Brzezinski M.A. Mining the diatom genome for the mechanism of biosilification // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2008. V. 105. № 5. P. 1391–1392.
  17. De Jonge M.D., Vogt S. Hard X-ray fluorescence tomography – an emerging tool for structural visualization // Current Opinion in Structural Biology. 2010. V. 20. P. 606–614.
  18. De Jonge M.D., Holzner C., Baines S.B., Twining B.S., Ignatyev K., Diaz J., Daryl L. Howard D.L., Legnini D., Miceli A., McNulty I., Jacobsen C.J., Vogt S. Quantitative 3D elemental microtomography *Cyclotella meneghiniana* at 400-nm resolution // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2010. V. 107(36). P. 15676–15680.
  19. Förstner U., Wittmann G.T.W. Metal Pollution in the Aquatic Environment. Berlin: Springer, 1983. 486 p.
  20. Goldich S.S. A study in rock weathering // J. Geol. 1938. V. 46(1). P. 17–58.
  21. Moor J., Ramamoorthy S. Heavy Metals in Natural Waters: Applied Monitoring and Impact Assessment. N. Y.: Springer, 1984. 288 p.
  22. Moore D.M., Reynolds R.C., Jr. X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. Oxford, New York: Oxford University Press, 1997. 378 p.
  23. Schlegel M.L., Manceau A., Charlet L., Hazemann J-L. Adsorption mechanisms of Zn on hectorite as function of time, pH, and ionic strength // American J. of Sci. 2001. V. 301. P. 798–830.
  24. Sparks D.L. Toxic metals in the environment: the role of surfaces // Elements. 2005. V. 1. P. 193–197.
  25. Sposito G. The surface chemistry of soils. N.Y.: Oxford Univ. Press, 1984. 234 p.

*Рекомендована к печати Б.А. Вороновым*

*G.V. Kharitonova, A.V. Ostroukhov, Ye.V. Utkina, N.S. Konovalova, A.S. Stenina*

### **Microelemental composition of bottom sediments of the Bureya river, Lower Bureya Hydropower Station area**

The methods of X-ray fluorescence analysis, laser diffractometry, scanning electron microscopy, and energy dispersion analysis were used to study the bottom sediment composition of the Bureya River and its tributaries in the Lower Bureya Hydropower Station area. The extremely low Cu and Ni contents have been identified in them, and the contents of other microelements have been established as not exceeding the average contents in the sedimentary rocks. It is shown that the microelemental composition of the bottom sediments of the Bureya River and its tributaries corresponds to the prevailing type of rocks of their catchment basin. The differences in the composition of the bottom sediments of the river channel and accumulation zones are statistically non-significant, which is due to the prevalence of physical weathering processes in the study territory.

**Keywords:** bottom sediments, microelements, Bureya River, the Russian Far East.