

**ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ И МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
РЕКИ АМУР В СРЕДНЕМ И НИЖНЕМ ТЕЧЕНИИ**

*С.Е. Сиротский¹, Г.В. Харитонова¹, В.И. Ким¹, М.А. Климин¹, Н.П. Чижикова², З. Тюгай³,
Н.С. Коновалова⁴, Е.В. Уткина¹*

¹ФГБУН Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 680000;
sirosky@ivep.as.khb.ru

²Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва

³Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

⁴ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 680000
Поступила в редакцию 15 июля 2013 г.

Исследованы донные отложения реки Амур. Проанализированы их гранулометрический и валовой составы. Показаны влияние р. Сунгари на формирование стока воды и взвешенных наносов и состав донных отложений Амура. Установлено, что только в тонкодисперсных фракциях донных отложений отмечается более чем двукратное (по сравнению с осадочными породами) накопление Fe, Mn, Zn и Cu. Показано участие глинистых минералов и диатомовых водорослей в накоплении Fe, Mn, Zn и Cu в донных отложениях.

Ключевые слова: донные отложения, гранулометрия, микроэлементы, р. Амур, Дальний Восток России.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема загрязнения окружающей среды для бассейна Амура становится все более актуальной в связи с бурным экономическим развитием Китайской Народной Республики. Река Сунгари – самый крупный приток Амура, бассейн которого практически полностью находится на территории КНР (рис. 1). В отдельные годы сток воды в реке Сунгари может превышать сток воды в Амуре и достигать 18000 м³/с. При прохождении паводков количество взвешенных веществ в Сунгари может превышать 1500 мг/дм³. Важными трансграничными притоками Амура являются Аргунь и Усури, сток воды которых в значительной степени влияет на экологическое состояние Амура. Однако наиболее высока антропогенная нагрузка (влияние сельского хозяйства, промышленного загрязнения, разработки полезных ископаемых, строительства гидротехнических сооружений) в бассейне р. Сунгари [21]. Основная область направленной аккумуляции речных наносов в бассейне Амура охватывает долину реки от впадения р. Сунгари до устья [6, 18].

При рассмотрении экологического состояния трансграничных рек и биосферных экосистем в це-

лом большое значение имеют исследования речных донных отложений, их гранулометрического состава. Гранулометрический состав речных донных отложений характеризует как условия аккумуляции речных наносов (гидрологический режим реки, геологические и тектонические процессы, происходящие в бассейне реки), так и реальные и возможные процессы накопления тех или иных загрязняющих веществ, поступающих с сопредельных территорий. Донные отложения различных водных систем традиционно используются в качестве индикатора интенсивности и масштабов техногенного загрязнения [17, 19].

Цель данной работы – исследование особенностей гранулометрического состава и распределения микроэлементов во фракциях донных отложений Амура. Работа является продолжением исследований авторов экосистемы р. Амур [13, 14, 18]. В данной работе основное внимание было уделено генерализации данных о гранулометрическом составе донных отложений и микроэлементном составе их отдельных фракций.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом изучения являлись донные отложения рукавов Амура, зон аккумуляции и припоймен-

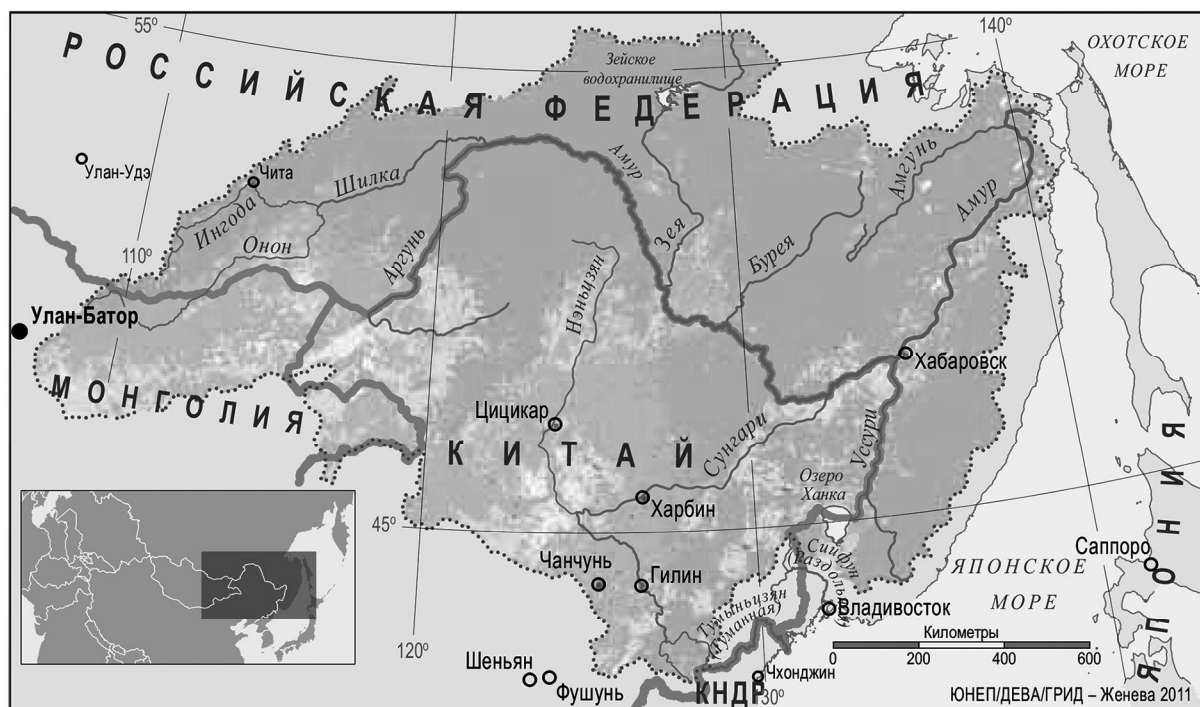


Рис. 1. Карта бассейна р. Амур [20].

ных озер. Отбор проб проводился на участке от устья р. Сунгари до Амурского лимана на различных морфологических створах Амура, его притоках и припойменных озерах в течение летне-осеннего периода 1997 г. Объектами биогеохимического опробования послужили сестон и эпилитон р. Амур. Сестон – взвешенные в воде планктонные микроорганизмы с примесью неорганических веществ – отбирали с помощью планктонной сети Апштейна из мельничного газа № 76 (диаметр ячейки 0.1 мм). Эпилитон – водоросли обрастания гравийно-галечного субстрата – отбирали методом смыва. Дополнительно были отобраны образцы осадков сточных вод (ОСВ) очистных сооружений г. Хабаровска. ОСВ – технический аналог сестона: в систему водоснабжения вода поступает непосредственно из р. Амур.

При выполнении гидрологических работ использовались стандартные оборудование и методики [7, 8]. В основу исследования положены гранулометрический и валовой химический анализы осадков, рентгеноспектральный микроанализ и электронно-микроскопические исследования отдельных фракций. Определение гранулометрического состава донных отложений русла производилось ситовым методом [2], донных отложений зон аккумуляции и припойменных озер – лазерно-дифракционным методом [22]. Илистые подфракции (< 2 мкм) дробной пептизации донных отложений – воднопептизуемый (ВПИ) и

агрегированный (АИ) илы – выделены по методу Горбунова [4].

Электронно-микроскопические исследования проводили на растровом электронном микроскопе “EVO 40 HV” (Карл Цейсс, Германия). Для съемки образцы были подготовлены методом суспензии в этиловом спирте с последующим высушиванием и напылением Au, увеличение до 50 000. Для анализа элементного состава наиболее репрезентативных участков препаратов использовали энергодисперсионный спектрометр “INCA Energy 350” (Oxford, Великобритания). Валовой макро- и микроэлементный состав фракций образцов донных отложений реперных участков определяли рентген-флуоресцентным энергодисперсионным методом (РФА) на приборе WRA-30. Анализ микроэлементного состава основной части образцов донных отложений, сестона, эпилитона и ОСВ был проведен эмиссионно-спектральным методом (ЭСА). Анализ проводили на приборах СТЭ-1 и ДФС-8. Все образцы были предварительно высушены при 105°C и озолены при 450°C.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ данных гранулометрического состава донных отложений предварим некоторыми определениями и общими соображениями для обоснования разделения отложений на русловые, зон аккумуляции и припойменных озер, а также выбранных методов

Таблица 1. Гранулометрический состав донных отложений русла и пригогов р. Амур.

Номер и местоположение створа	Номер и характеристика точки отбора					Размер фракции, мм										d_{50} , мм		
	№	l, м	h, м	v, м/с	5	10-50	7-10	5-7	3-5	1-3	0.5-1	0.25-0.5	0.1-0.25	<0.1				
						6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
1	2	3	4	5														
р. Амур																		
1а о. Ромашкин	т. 1	10	4.0	0.83	86.7	9.5	2.6	0.6	0.3	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	>10		
	т. 3	440	8.2	1.32	0	0	0.5	0.7	1.4	1.9	21.8	73.2	0.5	0.25				
	т. 5	800	2.0	1.13	0	0	0	0	1.3	1.8	9.6	19.6	67.7	<0.1				
	т. 6	1090	1.6	0.30	0	0	0	0	0	0.1	0.4	19.5	78.1	1.9	0.25			
	т. 3	210	5.0	0.74	0	0.8	1.7	2.6	8.7	7.7	29.7	48.7	0.1	0.25				
	т. 5	560	5.1	0.82	0	0.8	1.9	7.0	33.6	22.1	32.5	1.9	0.2	1				
2 г. Хабаровск	т. 1	60	4.4	0.57	0	0	0	1.2	2.6	24.2	65.4	6.5	0.1	0.5				
	т. 3	460	11.5	1.32	0	0	0.1	1.3	15.2	29.0	34.0	20.0	0.4	0.5				
	т. 1	20	4.0	0.77	1.8	2.0	3.4	7.9	30.9	12.0	30.8	10.5	0.7	1				
3 с. Сикачи-Алян	т. 4	680	0.2	0.68	0	0.7	1.0	3.5	12.9	11.6	24.9	44.9	0.5	0.5				
	т. 7	2060	6.6	0.76	2.4	6.5	9.4	22.4	38.1	8.2	10.9	2.0	0.1	3				
	т. 1	20	1.0	0.49	14.6	3.8	3.8	5.4	4.0	1.1	6.6	47.6	13.1	0.25				
4 о. Магнитный	т. 9	3010	2.3	0.36	0	0	0	0	1.9	1.5	13.0	83.5	0.1	0.25				
	т. 10	3310	2.6	0.29	0	0	0	0	1.5	3.1	25.9	68.9	0.6	<0.25				
	т. 3	140	3.2	0.81	30.6	20.4	11.5	10.9	11.7	2.2	6.9	5.7	0.1	7				
5а пр. Эморон	т. 1	20	4.0	0.93	2.0	0.6	0	0.1	0.4	0.3	32.2	63.8	0.6	0.25				
	т. 1	100	2.0	0.64	0	0	0	0.5	0.4	0.3	25.2	72.4	1.2	0.25				
	т. 4	960	3.4	0.75	0	0	0	0.2	1.5	0.8	6.4	90.9	0.2	0.25				
6 с. Малмыж	т. 5	1610	3.9	0.75	0	0	0	0.3	1.4	0.6	7.1	88.9	1.7	0.25				
	т. 4	380	17.4	0.77	0	0	0	0	0	0	0.2	95.0	4.8	0.25				
	т. 10	1060	16.9	1.10	2.3	4.0	9.2	18.7	37.3	11.2	15.4	1.8	0.1	3				
8 с. М.Горький	т. 1	20	5.0	0.76	0	0	0.6	0	0	0	0.1	72.6	26.7	0.25				
	т. 4	310	14.0	1.17	0.9	1.0	2.0	1.6	2.1	4.4	69.8	17.4	0.8	0.5				
	т. 2	100	10.0	0.45	0	0	0	0.1	0.7	0.4	3.1	81.5	14.2	0.25				
9а пр. Малый Амур	т. 5	670	12.0	1.03	0	0	0	0	0	0	0.2	92.7	7.1	0.25				
	т. 2	120	8.0	0.90	0	0	0.6	2.2	9.5	9.0	37.6	40.9	0.2	0.5				
	т. 4	360	7.4	0.93	0	0.2	1.5	1.0	3.2	7.0	42.5	44.1	0.5	0.5				
9б пр. Старый Амур	т. 7	630	5.8	0.66	0	0	0	0	0.1	0	3.9	95.1	0.9	0.25				

Таблица 1. (Продолжение).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10	с. Нижняя Гавань	т. 3 т. 5	300 1040	12.0 12.0	0.94 0.88	0 0	0 0	0.7 0.3	1.0 1.7	0.1 2.1	1.8 19.4	91.1 76.1	5.3 0.4	0.25 0.25
Притоки р. Амур														
12	р. Тунгуска (устье)	т. 3 т. 4	180 182	5.0 3.4	1.22 1.06	0 0.6	0.5 0.6	1.3 1.5	3.0 6.6	8.6 7.1	64.4 71.4	12.7 11.6	0.9 0.1	0.5 0.5
13	р. Горин (Первый Бык)	т. 1	20	1.5	0.14	33.9	16.2	6.3	5.5	7.2	13.2	12.1	2.1	5
14	р. Амгунь	т. 4 т. 5	160 210	2.6 15.0	0.30 0.62	31.4 0	8.5 0	4.9 0	4.1 1.0	8.6 2.5	21.2 9.6	14.3 85.3	1.7 1.0	3 0.25
р. Амур (фарватер)														
15	2 км выше устья Сунгари		–	–	–	1.3	3.0	6.3	9.6	19.4	37.8	8.2	0.3	1
16	2 км ниже устья Сунгари		–	–	–	0	0	0	0	0	2.0	21.9	76.0	<0.1

Примечание. l – расстояние от левого берега; h – глубина; v – скорость течения; d_{50} – средний диаметр частиц.

анализа. Донные отложения – это “закрепленные” на дне и подводных склонах водоемов наносы. Под речными наносами понимают совокупность минеральных и органических частиц, поступающих в водные потоки вследствие разрушения горных пород, почвенного покрова, размыва склоновых, речных, озерных, морских отложений и транспортируемых ими в направлении движения потока. В зависимости от среднего диаметра частиц они относятся к фракции валунов, гальки, гравия, песка, пыли, ила и глины. Эти же фракции входят в состав донных отложений вследствие переотложения и аккумуляции наносов. К частицам, способным “закреплять”, относят пыль и ил с глиной. В составе русловых отложений преобладают относительно крупные частицы. Пойменные отложения зон аккумуляции и припойменных озер в основном формируются более мелкими частицами – тонкий песок, пыль, ил. За границу размеров частиц между транзитной (бассейновой) и русловой составляющими наносов обычно принимают размер частиц ~ 100 мкм [1, 10, 12]. Именно поэтому в работе отдельно рассмотрены донные отложения основных рукавов Амура, зон аккумуляции и припойменных озер. Донные отложения были проанализированы соответствующими размерам частиц методами: отложения русла и проток – ситовым методом (< 0.1–10 мм), отложения зон аккумуляции и припойменных озер – лазерно-дифракционным методом (0.1–250 мкм).

Гранулометрический состав донных отложений русла (табл. 1) варьирует в широком диапазоне значений – от галечников до пылеватых частиц. По соотношению отдельных фракций отложения – галечно-гравийно-песчаные, преимущественные фракции – средний и мелкий песок – 70–98 %. Гравийные отложения характерны для створов, расположенных у с. Сикачи-Алян и г. Комсомольск-на-Амуре. Более грубые по составу галечные отложения с преимущественной фракцией 10–50 мм приурочены к левому берегу р. Амур. Наиболее крупные фракции (гравийные и галечные, а местами и крупный бульжник) повсеместно встречаются на перекатах вдоль всего фарватера Нижнего Амура [9]. Это размывтые и переотложенные отложения верхнечетвертичной полигенетической равнины. Известно, что состав донных отложений русла на том или ином створе кроме транспортирующей способности потока, глубины и морфологии дна русла зависит и от состава подстилающих более древних отложений [12]. Современные (голоценовые) пойменно-русловые отложения Амура “вложены” (размыты и переотложены) в полигенетические озерно-аллювиальные осадки позднечетвертичного возраста. Верхнечетвертичная полигенетическая аккумулятивная равнина с наивысшим уровнем аккумуляции за всю историю

формирования рельефа занимала в бассейне Амура обширную территорию, включая бассейны Сунгари, Усури, Амгуни и других притоков. Современная направленная аккумуляция наносов происходит на меньшей площади, захватывая лишь долину Нижнего Амура и низовья некоторых его притоков [6].

Следует отметить, что до впадения Сунгари донные отложения русла Амура характеризуются более грубым составом: средний и крупный песок и мелкий гравий составляют более 70 % (фарватер, 2 км выше устья притока). Ниже впадения р. Сунгари в Амур возрастает интенсивность осаждения взвешенных частиц в воде. Донные отложения ниже устья притока (фарватер, 2 км ниже устья) содержат более 70 % частиц размером меньше 0.1 мм, остальное – мелкий песок. На других участках Нижнего Амура, после впадения притоков подобных явлений не отмечается. При этом мутность сунгарийского потока воды остается достаточно высокой. Он не перемешивается с амурским потоком (существенно менее мутным) на протяжении более 270 км.

Донные отложения р. Амур в зонах аккумуляции и припойменных озер (табл. 2) – это транзитные наносы, преимущественный размер частиц которых < 100 мкм [10]. Согласно дифференциальным кривым (рис. 2), они представлены пелитовой, алевропелитовой и алевроитовой фракциями (0–2, 2–10 и 10–100 мкм, соответственно) приблизительно в равных долях. Мелкого песка (100–250 мкм) мало: максимум его содержания (5 %) отмечается у о. Ромашкин. Содержание алевропелитовой фракции в донных отложениях вниз по течению практически не меняется. Содержание и соотношение пелитовой и алевроитовой фракций обусловлено гидродинамическим режимом: с увеличением скорости течения содержание алевроитов возрастает, содержание пелитов – снижается. Что касается донных отложений зон аккумуляции эстуария Амура и Амурского лимана, их более грубый состав обусловлен влиянием приливно-отливных течений. Они выносят в Охотское и Японское моря основную массу взвешенного материала.

Донные отложения припойменных озер характеризуются гранулометрическим составом, близким к таковому отложений зон аккумуляции, что вполне закономерно, поскольку припойменные озера в условиях направленной аккумуляции имеют тесную связь с водным режимом Амура. В паводок вода поступает из Амура в протоки, соединяющие припойменные озера с Амуром. В межень сток имеет обратное направление. Некоторые различия связаны с перехватом припойменными озерами стока наносов, поступающего из притоков, и накоплением в них органического вещества. Общая тенденция перехвата стока наносов

притоков припойменными озерами проявляется в дифференциальных кривых гранулометрического состава. Так, для поверхностного слоя донных отложений оз. Бич-Хоуни (р. Горин) на дифференциальных кривых четко диагностируется дополнительный пик более крупной фракции с максимумом в 120 мкм. В свою очередь, минимальный в рассматриваемом ряду средний диаметр частиц отложений оз. Чля свидетельствует об их специфическом составе – сравнительно высоком содержании органического вещества.

Таким образом, донные отложения зон аккумуляции характеризуются наибольшим содержанием тонко-дисперсных компонентов – пелитовых или илистых частиц размером < 2 мкм. Последние вследствие большой удельной поверхности и особенностей минерального состава определяют процессы обмена экосистем с внешней средой, накопление тех или иных загрязняющих веществ, поступающих с сопредельных территорий. Разделение пелитовой (илистой) фракции на воднопептизируемую и агрегированную подфракции, которое часто используется в почвенных исследованиях, позволило оценить их участие в процессах сорбции микроэлементов.

Так, содержания микроэлементов (за исключением Zr) в донных отложениях р. Амур (табл. 3) не превышают средних содержаний элементов в осадочных породах [3]. Однако в тонкодисперсных фракциях по сравнению с остатком от отмучивания и донными отложениями в целом содержится существенно больше Zn и Cu. Средние содержания Zn в илистых фракциях составляют 146 (ВПИ) и 180 (АИ) мг/кг, в остатке от отмучивания илов – 59 мг/кг. Средние содержания Cu в ВПИ и АИ ~40 мг/кг, в остатке от отмучивания илов – 20 мг/кг. Аккумуляция микроэлементов тонкодисперсными компонентами донных отложений связана с образованием поверхностных комплексов катионов тяжелых металлов с глинистыми минералами [11, 20].

Илистые подфракции по сравнению с остатком от отмучивания и донными отложениями в целом характеризуются более высоким содержанием железа и марганца. Так, содержания Fe_2O_3 в ВПИ и АИ составляют 11.8 и 14.9 %. В донных отложениях в целом и в остатке от отмучивания илов эти показатели значительно ниже (4.9 и 2.9 %, соответственно). Высокие содержания железа обусловлены наличием в тонкодисперсной части донных отложений хлоритов и смешанослойных слюда-сметитовых образований.

Следует отметить, что наибольшей аккумулятивной способностью по отношению к Fe, Mn, Zn и Cu из биологических объектов в экосистеме Амура обладают водоросли – сестон и эпипитон. Содержание в

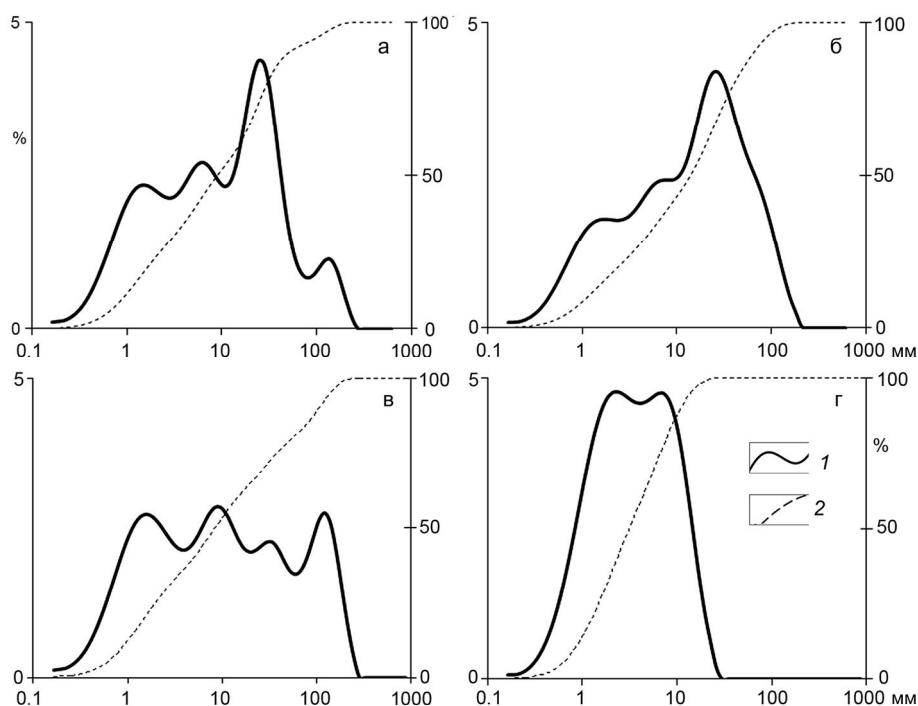


Рис. 2. Гранулометрический состав донных отложений р. Амур.

а – о. Ромашкин; б – протока Кафа; в – оз. Бич-Хоуни, г – оз. Чля.

1 – дифференциальные кривые, 2 – интегральные кривые гранулометрического состава.

Таблица 2. Гранулометрический состав отложений зон аккумуляции и озерных донных отложений.

Образец, местоположение		Размер частиц, мкм				d ₅₀ , мкм
		< 2	2–10	10–100	100–275	
Донные отложения зон аккумуляции						
т. 1	пр. Луговая	37.85	32.34	29.81	0	4.2
т. 2	о. Ромашкин	24.25	28.95	41.33	5.47	9.4
т. 3	пр. Амурская	34.24	35.28	30.48	0	4.2
т. 4	пр. Кафа	18.36	26.16	52.82	0	14.1
т. 5	г. Амурск	24.09	32.6	43.31	0	8.2
т. 6	пр. Тахта	26.08	30.81	43.11	0	7.2
т. 7	пр. Пальвинская	29.99	32.74	35.83	1.44	6.3
	М*	29.4	32.1	37.3		4–9
	%s	23.9	9.5	20.6		
Озерные донные отложения						
т. 8	оз. Болонь	23.75	30.17	45.32	0.76	8.47
т. 9	оз. Калгахэвэн	28.26	34.52	37.23	0	6.39
т.10	оз. М. Шарга	31.05	32.39	36.66	0	5.56
т.11	оз. Бич-Хоуни	26.03	26.91	37.05	10.01	8.47
т.12	оз. Чля	36.16	50.95	12.86	0	3.17
	М**	27.3	31.0	39.1		5–8
	%s	11.4	10.5	10.7		
Эстуарий и Амурский лиман						
т.13	с. Астрахановка	18.88	23.93	52.39	4.80	13.88
т.14	м. Озерпах	18.22	22.69	52.14	6.94	14.85
	М	18.6	23.3	52.26	5.9	14

Примечание. М – средние значения; %s – стандартное отклонение в процентах; * – без учета данных пр. Кафа; ** – без учета данных оз. Чля. Остальные пояснения в тексте.

Таблица 3. Распределение микроэлементов по фракциям донных отложений р. Амур, мг/кг.

Фракция, объект	Показатель	Ni	Cu	Zn	Ga	Pb	Rb	Sr	Y	Zr
ВПИ	M ₈	52	41	146	26	17	124	164	25	141
	min	43	33	135	16	0	108	76	21	124
	max	60	51	158	31	42	138	230	28	160
	s	6	7	8	5	19	9	47	3	12
	% s	11	18	6	18	110	8	28	12	8
АИ	M ₈	59	40	180	31	17	143	100	30	176
	min	47	33	159	25	0	130	61	28	155
	max	74	50	193	36	41	152	117	31	218
	s	10	6	14	4	19	6	17	1	20
	% s	17	15	8	13	109	4	17	3	11
ОО	M ₈	24	20	59	17	21	107	309	29	371
	min	12	6	44	9	14	95	175	23	297
	max	34	40	81	29	30	120	387	35	470
	s	7	11	13	7	6	9	67	4	59
	% s	31	53	22	42	28	8	22	13	16
ДО	M ₈	21	27	90	18	30	124	274	31	367
	min	0	13	68	9	20	113	150	29	291
	max	47	49	116	29	35	141	358	34	510
	s	15	11	18	7	5	8	62	2	84
	% s	71	40	20	39	18	7	23	6	23
Сестон	M ₂₄	19	50	220	15	33	–	100	12	140
Эпилитон	M ₃₀	25	40	170	13	20	–	100	10	100
ОСВ	M ₆	35	200	410	20	25	–	100	13	200
ДО	M ₅₁	35	20	80	19	20	–	160	30	370
ОП		95	57	80	30	20	200	450	30	200

Примечание. ВПИ – воднопептизируемый ил, АИ – агрегированный ил, ОО – остаток от отмучивания, ДО – донные отложения, ОСВ – осадки сточных вод, ОП – осадочные породы, средние содержания по А.П. Виноградову [3]; М – средние значения, нижний индекс – число проанализированных образцов; s – стандартное отклонение; % s – процент от среднего; прочерк – нет данных.

сестоне Zn и Cu даже несколько выше, чем в тонкодисперсных фракциях донных отложений. В осадке сточных вод (технический аналог сестона) отмечается еще большее накопление Zn и Cu – 200 и 400 мг/кг, соответственно. Аккумуляция Fe, Mn, Zn и Cu в сестоне, эпилитоне и ОСВ позволяет предполагать, что накопление этих элементов в тонкодисперсных фракциях донных отложений может происходить (один из возможных механизмов) за счет продукт-субстратного взаимодействия [5] диатомовых водорослей в системе речная вода–взвеси–донные отложения (глинистые минералы).

Действительно, как показал РЭМ-анализ, донные отложения и их пелитовые фракции содержат большое количество диатомовых водорослей (рис. 3). Представители основных семейств были обнаружены и в речных взвесах Амура и Сунгари. В составе остатка донных отложений после отмучивания илов диагностируются только корродированные зерна кластогенных минералов (полевые шпаты разной степени выветрелости и дисперсности), диатомовых водорослей практически нет.

Известно, что диатомовые водоросли играют большую роль в создании первичной продукции и в геохимических циклах элементов (кремний, углерод), для их роста необходимы Fe, Mn, Zn и Cu. Железо является одним из основных (после Si и N) регуляторов роста популяции диатомовых водорослей [15]. Определение содержания тех или иных элементов в составе диатомовых водорослей крайне затруднительно вследствие недостаточности разработки методов анализа и способов их выделения без изменения состава. Однако M.D. de Jonge с соавторами [16] удалось блестяще решить эту задачу для клетки диатомовой водоросли *Cyclotella meneghiniana* (семейство Stephanodiscaceae). Использование рентгенфлюоресцентной микротомографии с высоким разрешением (400 нм) позволило авторам показать и доказать участие именно Fe, Mn, Zn и Cu в составе “живой” клетки (высушена для анализа после выделения из культуры).

Почти двукратное превышение содержания Zr в донных отложениях в целом и остатке от отмучивания илов по сравнению со средним его содержа-

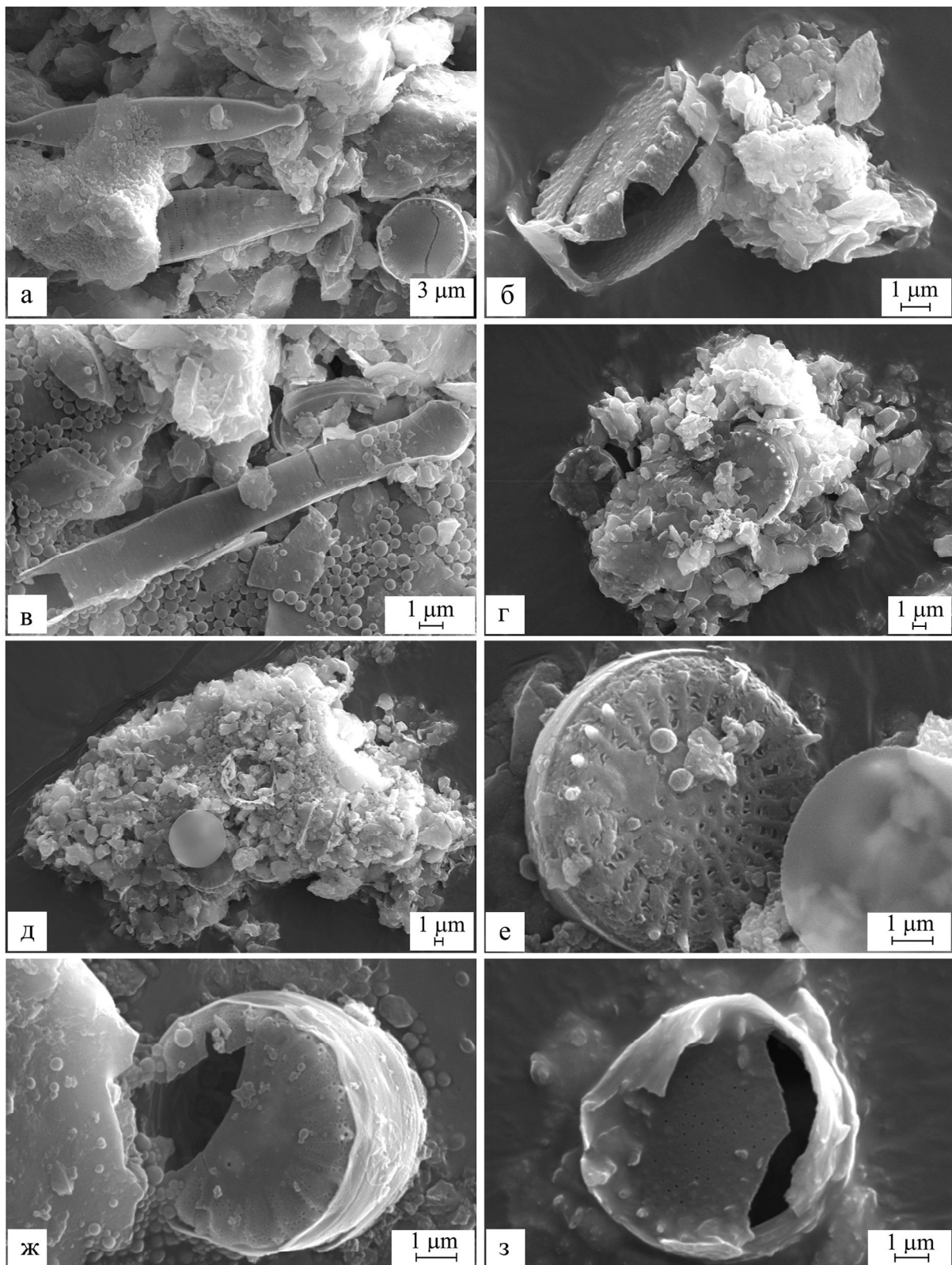


Рис. 3. Микрофотографии (РЭМ) диатомовых водорослей в донных отложениях р. Амур в целом (а–в), их воднопептизируемых илах (г, д) и в транспортируемых взвешях р. Амур (е, ж) и р. Сунгари (з).

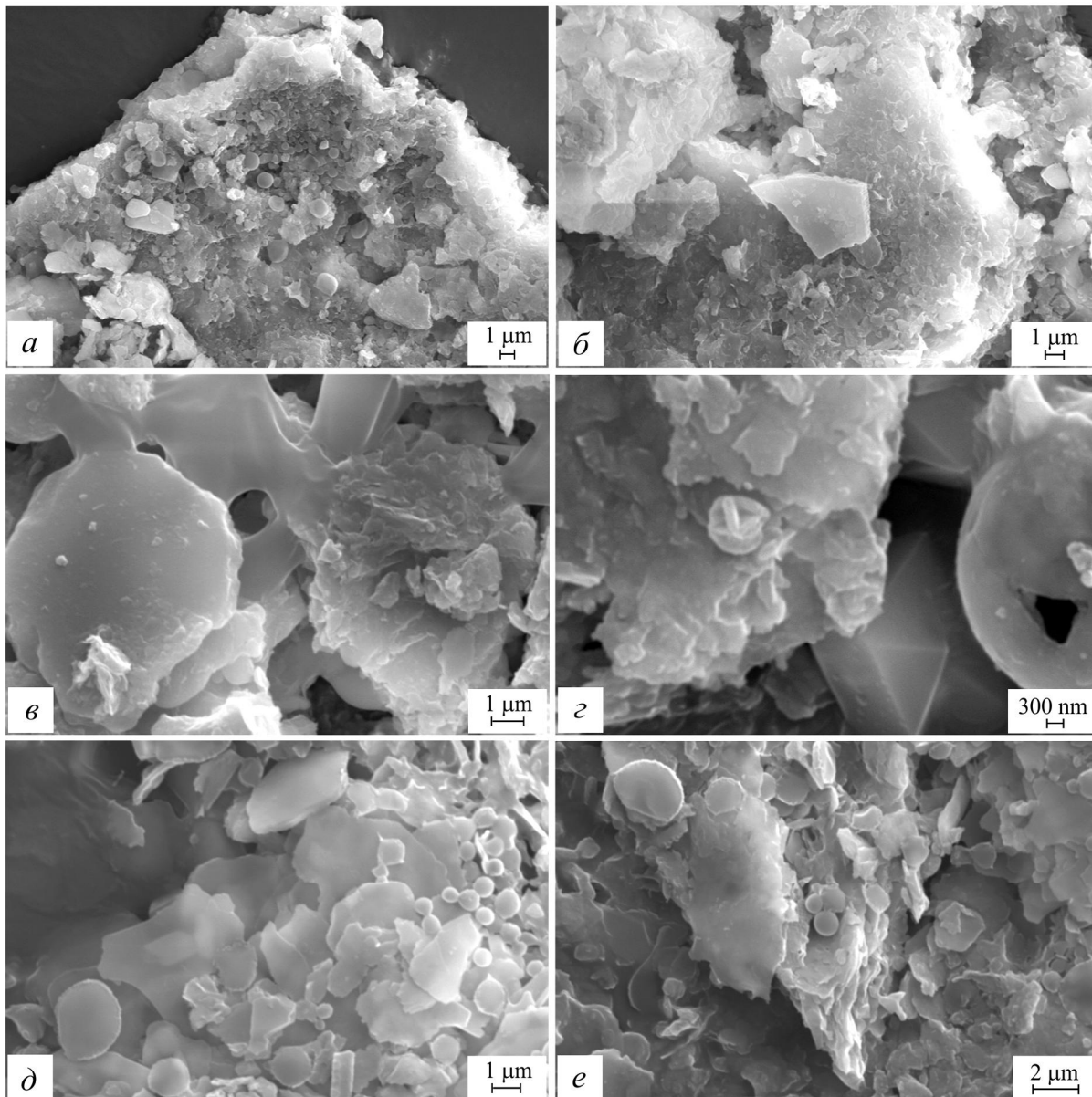


Рис. 4. Микрофотографии (РЭМ) тонкодисперсных компонентов речных взвесей (а–г) и донных отложений зон аккумуляции (д, е): а, б – р. Амур; в, г – р. Сунгари; д, е – о. Ромашкин.

нием в осадочных породах и содержанием в ВПИ и АИ (367–371, 200 и 141–176 мг/кг, соответственно) связано с присутствием в донных отложениях циркона. Циркон, стойкий к выветриванию акцессорный минерал изверженных пород, часто встречается в тяжелой фракции осадочных отложений. Как показал рентгеноспектральный микроанализ, в тонкодисперсных фракциях донных отложений встречаются только единичные ксеноморфные микрокристаллы циркона размером 1–2×4–10 мкм. В остатке от отмучивания илов были обнаружены крупные кристаллы циркона – практически идиоморфные (несколько выветрелые и

окатанные) размером до 40×120 мкм. РСМА-анализ показал, что это циркон без примесей с идеальной формулой $ZrSiO_4$ (отношение $Zr:Si \sim 1:1$).

Проведенные нами исследования тонкодисперсной части верхних горизонтов почв территории водосбора, пойменных наилок, взвешенных веществ в воде реки и донных отложений зон аккумуляции позволили установить тесную связь минералогического состава этих частей геосистемы. Так, с помощью методов рентгеноструктурного анализа было показано [13], что тонкодисперсные компоненты (воднопептизируемый и агрегированный илы) наилок поймы,

донных отложений зон аккумуляции и поверхностных горизонтов почв водосбора имеют сходный состав минералов. Было отмечено большее сходство илов донных отложений с наилками поймы и взвешенными веществами р. Сунгари, чем с почвами водосбора и взвешенными веществами р. Амур (выше впадения р. Сунгари). Взвешенные вещества р. Амур представляют собой довольно грубый кварц-полевошпатовый материал с небольшой примесью слоистых силикатов (главным образом, каолинит совершенной структуры, сильно деградированные гидрослюды и смешанослойные образования с низким содержанием смектитовых пакетов). Взвешенные вещества р. Сунгари отличаются от взвешенных веществ р. Амур значительной примесью слоистых силикатов, соответствующих по составу тонкодисперсным компонентам воднопептизируемого ила поверхностных горизонтов почв водосбора. Минералогический состав взвешенных веществ р. Усури отличается существенным преобладанием мусковит-серицитов при низком содержании кварца и полевых шпатов. Данные растровой электронной микроскопии (рис. 4) подтверждают сходство минералогического состава тонкодисперсной части донных отложений Амура, взвешенных веществ р. Сунгари, а также почв водосбора, их преимущественно гидрослюдистый состав. Это обусловлено влиянием на состав донных отложений Амура как стока взвешенных наносов р. Сунгари, так и продуктов размыва переотложенных осадков Среднеамурской равнины и почв, развитых на этих отложениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Область современной направленной аккумуляции Амура от впадения Сунгари до устья характеризуется преимущественным накоплением в донных отложениях русла (галечно-гравийно-песчаных по составу) среднего и мелкого песка, что соответствует равнинному характеру этого участка реки.

Донные отложения зон аккумуляции и припойменных озер – это транзитные пелитово-алевритовые наносы. Они характеризуются близким гранулометрическим составом, поскольку припойменные озера в условиях направленной аккумуляции имеют тесную связь с водным режимом Амура. Содержание алевропелитовой фракции в донных отложениях вниз по течению реки практически не изменяется (относительные изменения менее 10 %). Соотношение пелитовой и алевритовой фракций отражает гидродинамический режим зоны аккумуляции.

На состав донных отложений основных рукавов, зон аккумуляции и припойменных озер Нижнего Амура определяющее влияние оказывают размыв и

переотложение озерно-аллювиальных осадков четвертичного возраста. Притоком, наиболее сильно влияющим не только на формирование стока воды и взвешенных частиц, но и на состав донных отложений (их тонкодисперсной части), является Сунгари.

При оценках техногенного загрязнения бассейна Амура (накопления тех или иных микроэлементов) следует иметь в виду, что именно тонкодисперсные компоненты донных отложений характеризуются наибольшей в этом отношении информативностью. Так, если в настоящее время содержание микроэлементов в донных отложениях р. Амур за исключением Zr не превышает их средних содержаний в осадочных породах, то в тонкодисперсных фракциях отмечается более чем двукратное (по сравнению с осадочными породами) накопление Fe, Mn, Zn и Cu. Аккумуляция микроэлементов тонкодисперсными компонентами донных отложений связана с образованием ими поверхностных комплексов с глинистыми минералами. Накопление указанных элементов в тонкодисперсной части донных отложений может происходить также за счет диатомовых водорослей сестона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 202 с.
2. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М.: Высш. шк., 1973. 400 с.
3. Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
4. Горбунов Н.И., Цюрупа И.Г., Шурыгина Е.А. Рентгенограммы, термограммы и кривые обезвоживания минералов, встречающихся в почвах и глинах. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 185 с.
5. Заварзин Г.А. Лекции по природоведческой микробиологии. М.: Наука, 2004. 348 с.
6. Махинов А.Н. Современное рельефообразование в условиях аллювиальной аккумуляции. Владивосток: Дальнаука, 2006. 232 с.
7. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 2. Ч. II. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 263 с.
8. Руководство по гидрологической практике. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 513 с.
9. Соловьев И.А. Скорости течения и мутность воды вдоль фарватера Нижнего Амура // Вопросы географии Дальнего Востока. Хабаровск: ХабКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1973. Сб. 13. С. 69–84.
10. Страхов Н. М. Основы теории литогенеза. М.: Изд-во АН СССР, 1962. Т. II. 575 с.
11. Харитонова Г.В., Чижикова Н.П., Манучаров А.С., Коновалова Н.С. Взаимодействие солей с глинистыми минералами // Тихоокеан. геология. 2012. Т. 31, № 3. С. 81–92.
12. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география и практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во

- ЛКИ, 2008. 608 с.
13. Чижикова Н.П., Харитонова Г.В., Матюшкина Л.А. и др. 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., Харитонова Г.В. и др. Минералогический и химический состав тонкодисперсной части донных отложений р. Амур // Почвоведение. 2011. № 7. С. 848–860.
 15. Brzezinski M.A. Mining the diatom genome for the mechanism of biosilification // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2008. V. 105, N 5. P. 1391–1392.
 16. De Jonge M.D., Holzner C., Baines S.B. et al. Quantitative 3D elemental microtomography *Cyclotella meneghiniana* at 400-nm resolution // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2010. V. 107(36). P. 15676–15680.
 17. Förstner U., Wittmann G.T.W. Metal pollution in the aquatic environment. Berlin: Springer, 1983. 486 p.
 18. Kim V.I. Hydrological regime of the Amur River and changes caused by economic activities // Report on Amur-Okhotsk Project. N 6. Japan (Kyoto): Research Inst. for Humanity and Nature, 2010. P. 129–138.
 19. Moor J., Ramamoorthy S. Heavy metals in natural waters: Applied monitoring and impact assessment. N. Y.: Springer, 1984. 288 p.
 20. Schlegel M.L., Manceau A., Charlet L., Hazemann J-L. et al. Adsorption mechanisms of Zn on hectorite as function of time, pH, and ionic strength // Amer. J. of Sci. 2001. V. 301. P. 798–830.
 21. Second assessment of transboundary rivers, lakes and ground waters. P. IV. Ch. 2. Drainage basins of the Sea of Okhotsk and Sea of Japan. Geneva: United Nations, 2011. P. 99–106.
 22. Shein E. V., Milanovskii E. Yu., Molov A. Z. The effect of organic matter on the difference between particle-size distribution data obtained by the sedimentometric and laser diffraction methods // Eurasian Soil Sci. 2006. V. 39. Suppl. 1. P. S84–S90.

Рекомендована к печати Б.А. Вороньм

*S.E. Sirotskii, G.V. Kharitonova, V.I. Kim, M.A. Klimin, N.P. Chizhikova, Z. Tyugai,
N.S. Konovalova, E.V. Utkina*

The granulometric and microelemental composition of bottom sediments in the Amur River middle and lower reaches

Bottom sediments of the Amur River basin have been studied. Their granulometric and gross compositions have been analyzed. The influence of the Sungari River on both the formation of water runoff and suspended load, and the composition of bottom sediments is shown. It has been established that the Fe, Mn, Zn, and Cu content in finely-dispersed subfractions was twice as large as that in the bottom sediments. The role of clay minerals and diatoms in Fe, Mn, Zn, and Cu accumulation is shown.

Key words: bottom sediments, grain sizing, minor elements, Amur River, Far East of Russia.