

## Донные отложения реки Амур

© 2011. С. Е. Сиротский<sup>1</sup>, к.б.н., с.н.с., Н. П. Чижикова<sup>2</sup>, д.с.-х.н., зав. лабораторией, Г. В. Харитонов<sup>1</sup>, д.б.н., с.н.с., А. С. Манучаров<sup>3</sup>, к.б.н., доцент, Н. С. Коновалова<sup>4</sup>, м.н.с., Е. В. Уткина<sup>1</sup>, вед. инженер,

<sup>1</sup>Институт водных и экологических проблем ДВО РАН,

<sup>2</sup>Почвенный институт им. В. В. Докучаева,

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,

<sup>4</sup>Институт тектоники и геофизики ДВО РАН,

e-mail: gkharitonova@mail.ru

Исследован фракционный состав донных отложений р. Амур. Проанализирован валовой состав донных отложений и их илистых подфракций – воднопептизируемый (ВПИ) и агрегированный (АИ) илы. По сравнению с донными отложениями в целом ВПИ и АИ характеризуются высокой аккумулятивной способностью по отношению к Fe, Mn, Cu и Zn. Показана функциональная роль диатомовых водорослей в аккумуляции Fe, Mn, Cu и Zn тонкодисперсными компонентами донных отложений.

The fraction composition of the Amur River bottom sediments was studied. The total content of river bottom sediments and their clay sub-fractions – water-peptizate (WPC) and aggregated clays (AC) were analyzed. Compared to bottom sediments, WPC and AC in general are characterized with a high capacity to accumulate Fe, Mn, Cu and Zn. The functional role of diatoms in accumulation of Fe, Mn, Cu and Zn by fine-grained components of bottom sediments is shown.

Ключевые слова: донные отложения, илистые подфракции, диатомовые водоросли

Key words: bottom sediments, clay sub-fractions, diatoms

## Введение

Донные отложения поверхностных водотоков являются важным источником информации о геохимических и экологических условиях всего бассейна и традиционно используются в качестве индикатора для выявления состава, интенсивности и масштаба техногенного загрязнения. Проблема загрязнения для бассейна Амура в настоящее время в связи с бурным экономическим развитием Китая становится всё более актуальной [1]. Одним из самых крупных притоков р. Амур является р. Сунгари, бассейн которой полностью находится на территории Китая и составляет почти треть бассейна р. Амур. Донные отложения и главным образом их пелитовая фракция играют большую роль в накоплении ряда макро- и микроэлементов, формировании самоочищающей способности реки и регуляции состава речных вод. Важно выявить особенности состава их наиболее активной и реакционноспособной части – тонкодисперсного комплекса.

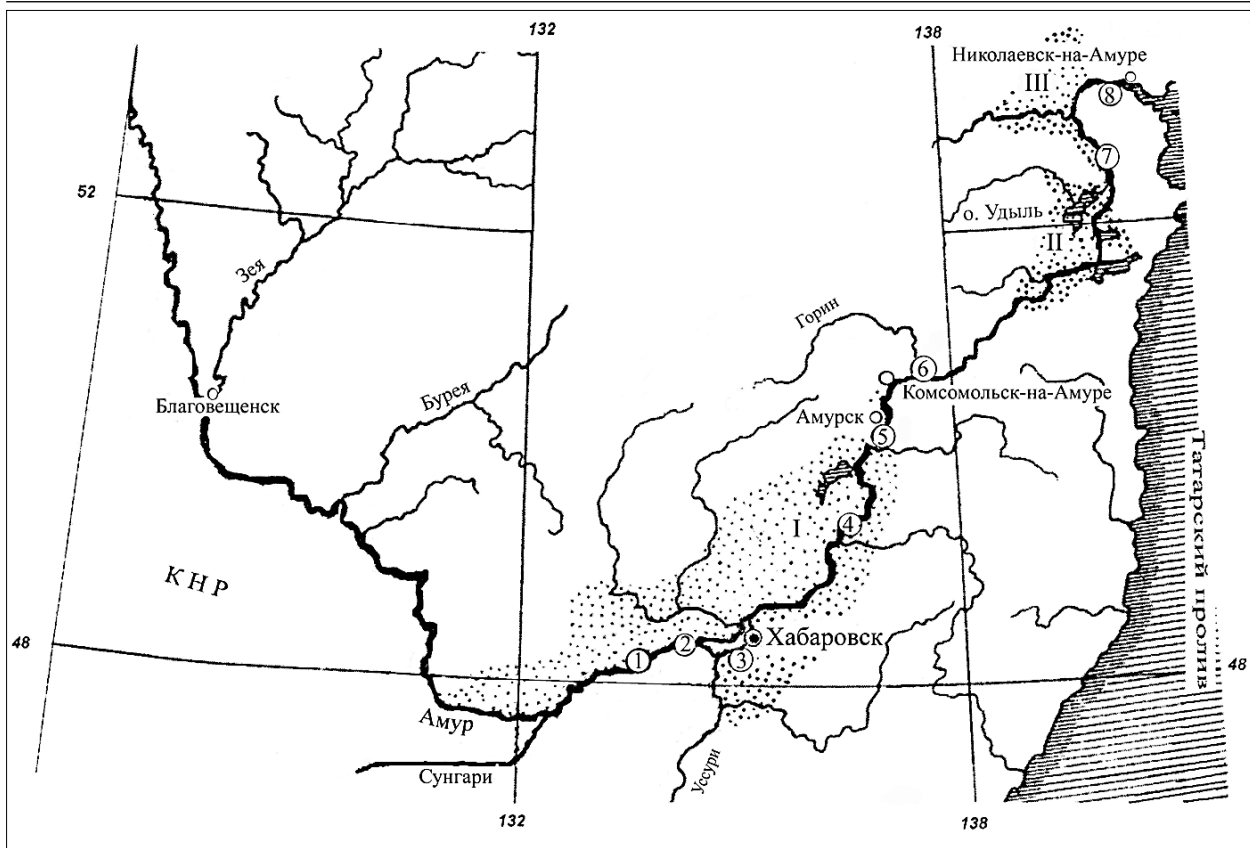
Задачей настоящей работы явилось исследование состава донных отложений р. Амур от устья р. Сунгари до Амурского лимана. Основное внимание было уделено микроэле-

ментному составу тонкодисперсных компонентов донных отложений и их электронно-микроскопическому исследованию.

## Объекты и методы исследований

Работы проводились на равнинной части бассейна среднего и нижнего Амура. Основное питание река получает в пределах среднего Амура (участок от г. Благовещенск до г. Хабаровск), где впадают все главные притоки – реки Зея, Бурея, Сунгари и Уссури (рис. 1). Средний Амур приобретает черты равнинной реки с выходом на Амуро-Сунгарийскую равнину, российскую часть которой называют Среднеамурской низменностью. Это низкая (от 45 до 100 м абс. высоты) заболоченная равнина с несколькими уровнями речных террас и обширной поймой до 10–30 км. Для климата характерно сочетание умеренной континентальности с муссонными чертами. Среднегодовая температура 0,6–1,1°C, среднегодовое количество осадков в районах исследования от 400–500 мм (на западе) до 600–700 мм (на юго-востоке).

В геологическом отношении равнина характеризуется широким развитием четвертичных отложений, перекрывающих более



**Рис. 1.** Карта-схема района исследования. I – Среднеамурская, II – Удыль-Кизинская и III – Амуро-Амгунская низменности. Места отбора донных отложений: 1 – протока Луговая, 2 – о. Ромашкин, 3 – протока Амурская, 4 – протока Кафа, 5 – г. Амурск, 6 – р. Горин, 7 – п. Тахта, 8 – протока Пальвинская

древние слои аргиллитов, алевролитов, песчаников и вулканогенных осадочных пород. Четвертичные отложения представлены комплексом осадков аллювиальных и озёрно-аллювиальных фаций разновозрастных террас – глины и суглинки, а также пески, гравийники, галечники. Почвенный покров Среднеамурской низменности имеет в основном среднечетвертичный возраст. В позднечетвертичный период эволюция аллювиально-озёрных равнин происходила главным образом в направлении от супераквальных к неоаллювиальным ландшафтам вследствие изменения климата в сторону большей влажности и сопровождалась усилением заболачивания.

Объектом изучения явились донные отложения, их тонкодисперсные компоненты и речные взвеси. Отбор проб донных отложений проводили в зонах аккумуляции от устья р. Сунгари до Амурского лимана. Пробы воды в Амуре отбирали ежегодно на участке от г. Благовещенск до устья реки с 1997-го по 2007 г. Выделение транспортируемых речных взвесей р. Сунгари проводили из проб воды, отобранных в зоне впадения её в Амур. Для контроля были отобраны пробы воды в

р. Амур (п. Нагибово, 80 км выше впадения р. Сунгари). Объектами биогеохимического опробования послужили сестон, перифитон, макрофиты и ихтиофауна р. Амур. Сестон – взвешенные в воде планктонные микроорганизмы с примесью неорганических веществ – отбирали с помощью мелкоячеистой планктонной сетки (диаметр ячейки 0,01 мм). Планктонные микроорганизмы в р. Амур представлены преимущественно диатомовыми водорослями [2]. Перифитон – водоросли обрастания гравийно-галечного субстрата, также преимущественно диатомовые – отбирали методом смыва. Макрофиты Амуре представлены болотоцветником стрелолистом и рдестами, ихтиофауна – частичковыми. Дополнительно были отобраны образцы осадков сточных вод (ОСВ) очистных сооружений г. Хабаровск. ОСВ – технический аналог сестона: в систему водоснабжения вода поступает непосредственно из р. Амур. Для сравнения были использованы данные валового состава 1 м керна донных отложений (ДО) оз. Удыль (рис. 1, озеро соединено с Амуром протокой, накопление ДО ~ 10 тыс. лет). Анализ керна проводился по слоям через каждые 5 см.

В основу исследования положено изучение состава донных отложений реперных участков (рис. 1). Илстые подфракции дробной пептизации донных отложений – воднопептизируемый (ВПИ) и агрегированный (АИ) илы – выделяли по методу Горбунова [3]. При выделении ВПИ и АИ из донных отложений во избежание потерь микроэлементов коагуляторы не использовали. Взвешенное вещество из проб воды коагулировали добавлением HCl до полного осаждения, промывали дистиллированной водой до отрицательной реакции на Cl<sup>-</sup>-ионы и обрабатывали 10%-ным раствором H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> для удаления органического вещества. Гигроскопическую влажность и общее содержание углерода определяли по стандартным методикам.

Валовой состав образцов донных отложений и их фракций определяли рентгенофлюоресцентным энергодисперсионным методом (РФА) на приборе WRA-30. Анализ микроэлементного состава компонентов системы «вода – донные отложения – водоросли – макрофиты – ихтиофауна» для получения сравнимых данных был проведён эмиссионно-спектральным методом (ЭСА). Анализ проводили на приборах СТЭ-1 и ДФС-8. Все образцы предварительно высушены при 105°C и озолены при 450°C. Анализ воды методом ЭСА проводили в сухом остатке. Некоторые различия в результатах РФА и ЭСА методов анализа связаны с тем, что метод ЭСА является полуколичественным, соответственно метод РФА предпочтительнее. Однако метод ЭСА до сих пор широко используется при решении отдельных геохимических задач.

Анализ валового состава донных отложений и их тонкодисперсных фракций был дополнен электронно-микроскопическими исследованиями на растровом электронном микроскопе «EVO 40 HV» (Карл Цейс, Герма-

ния). Образцы для съёмки были подготовлены методом суспензии в этиловом спирте, с последующим высушиванием и напылением Au, увеличение до 50000.

### Результаты и обсуждение

Основные подходы к оценке миграции и перераспределения тонкодисперсного вещества (воднопептизируемый ВПИ и агрегированный АИ илы) в среде были разработаны для почв и почвообразующих пород, поэтому сравнения базируются на результатах анализа почв рассматриваемого бассейна [3]. Ранее для почв было показано, что именно ВПИ является наиболее подвижной фракцией ила и в первую очередь способен к перераспределению и миграции. Меньшей подвижности и большей агрегированности АИ по сравнению с ВПИ способствуют его обогащённость органическим веществом, оксидами-гидроксидами железа и глинистыми минералами с набухающей кристаллической решёткой.

Анализ донных отложений показал, что содержание в них ила (сумма ВПИ и АИ) закономерно увеличивается вниз по продольному профилю реки с 14 до 26% (табл. 1). Накопление в донных отложениях тонкодисперсных компонентов вниз по продольному профилю реки вызывает соответствующее возрастание в них содержания общего углерода и гигроскопической влажности. Резкий скачок в содержании тонкодисперсной части донных отложений в Амурской протоке (31%) связан с приустьевым эффектом р. Уссури, крупного притока Амура, для которого в последнее время отмечается увеличение отложения наносов в устье [4]. Фракционный анализ содержания илов ВПИ и АИ свидетельствует о симбатном характере их накопления в донных отложениях вниз по продольному профилю. Коли-

Таблица 1

Состав и свойства донных отложений р. Амур

Образец	Содержание ила, %			АИ, % от суммы	C <sub>общ.</sub> , %	W <sub>гигр.</sub> , %
	ВПИ	АИ	Сумма			
т. 1 пр. Луговая	2,4	11,6	14,0	83	0,56	1,01
т. 2 о. Ромашкин	7,2	12,1	19,3	63	0,89	1,74
т. 3 пр. Амурская	8,7	22,5	31,2	72	1,59	3,60
т. 4 пр. Кафа	4,5	11,2	15,7	71	0,49	1,34
т. 5 г. Амурск	6,6	13,2	19,8	67	0,74	1,90
т. 6 р. Горюн	9,0	14,2	23,2	61	1,98	2,29
т. 7 п. Тахта	9,8	15,7	25,5	61	1,28	2,12
т. 8 пр. Пальвинская	8,2	16,8	25,0	67	1,39	2,55

Примечание: C<sub>общ.</sub> – содержание углерода, расчёт на воздушно-сухое вещество; W<sub>гигр.</sub> – гигроскопическая влажность.

Таблица 2

Валовой состав донных отложений р. Амур

Фракция	ДО	ОО	ВПИ	АИ
Макроэлементы, %				
SiO <sub>2</sub>	<u>64,63</u> 64,47–68,00	<u>73,53</u> 70,8–75,99	<u>56,11</u> 50,88–56,42	<u>55,22</u> 53,35–58,28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<u>15,13</u> 13,90–16,37	<u>12,62</u> 10,3–13,37	<u>17,14</u> 16,97–18,38	<u>19,79</u> 19,07–20,76
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<u>4,87</u> 3,81–6,44	<u>2,88</u> 2,37–3,91	<u>10,90</u> 10,02–12,99	<u>14,91</u> 13,85–16,16
TiO <sub>2</sub>	<u>0,81</u> 0,67–1,05	<u>0,73</u> 0,58–0,89	<u>0,91</u> 0,82–0,98	<u>1,11</u> 0,99–1,18
MnO	<u>0,12</u> 0,07–0,20	<u>0,07</u> 0,05–0,16	<u>0,22</u> 0,14–0,36	<u>0,23</u> 0,12–0,34
CaO	<u>1,48</u> 0,71–1,70	<u>1,45</u> 0,74–1,69	<u>3,06</u> 1,26–4,82	<u>1,56</u> 1,00–1,78
MgO	<u>0,39</u> 0,20–0,70	<u>0,30</u> 0,05–0,54	<u>2,18</u> 2,06–2,62	<u>2,55</u> 1,62–3,76
K <sub>2</sub> O	<u>3,01</u> 2,69–3,27	<u>2,95</u> 2,46–3,40	<u>3,31</u> 2,94–3,67	<u>3,02</u> 2,82–3,33
Na <sub>2</sub> O	–	–	<u>1,68</u> 1,18–2,14	<u>0,48</u> 0,15–1,29
Микроэлементы, мг/кг				
Ni	<u>21</u> 0–47	<u>24</u> 12–34	<u>52</u> 43–60	<u>59</u> 47–74
Cu	<u>27</u> 13–49	<u>20</u> 6–40	<u>41</u> 33–51	<u>40</u> 33–50
Zn	<u>90</u> 68–116	<u>59</u> 44–81	<u>146</u> 135–158	<u>180</u> 159–193
Ga	<u>18</u> 9–29	<u>17</u> 9–29	<u>26</u> 16–31	<u>31</u> 25–36
Pb	<u>30</u> 20–35	<u>21</u> 14–30	<u>17</u> 0–42	<u>17</u> 0–41
Rb	<u>124</u> 113–141	<u>107</u> 95–120	<u>124</u> 108–138	<u>143</u> 130–152
Sr	<u>274</u> 150–368	<u>309</u> 175–387	<u>164</u> 76–230	<u>100</u> 61–117
Zr	<u>367</u> 291–510	<u>371</u> 297–430	<u>141</u> 124–160	<u>176</u> 155–218

Примечание: числитель – средние значения, знаменатель – min-max интервал; ОО – остаток от отмучивания илов; прочерк – содержание элемента ниже предела обнаружения.

чество ВПИ возрастает с 2 в протоке Луговая до 8–10% в низовьях реки (п. Тахта, протока Пальвинская), содержание АИ увеличивается с 12 до 16–17%.

Следует отметить, что содержание ила в донных отложениях соответствует его содержанию в суглинисто-глинистых почвах Среднеамурской низменности и составляет 16–31 и 19–40% соответственно. Факт достаточно неожиданный, так как илистая фракция донных отложений подвергается мощному фазовому воздействию водной среды. Однако, если обратиться к показателю степени агрегированности ила (отношение АИ/ВПИ), получаем

совершенно иную картину. Средняя величина степени агрегированности ила донных отложений существенно ниже, чем соответствующие величины для гумусово-аккумулятивных горизонтов почв Среднеамурской низменности (2,1 и 8,4 соответственно). По степени агрегированности ила донные отложения приближаются к почвообразующим породам Среднеамурской низменности.

Валовой РФА анализ донных отложений реперных участков (табл. 2) позволяет выявить некоторые интересные особенности распределения макро- и микроэлементов по фракциям донных отложений. Из наиболее важных

Таблица 3

Микроэлементный состав воды, золы донных отложений и биологических объектов р. Амур\*

Элемент	Речные воды [5]	Речная вода n = 85	ОП [6]	ДО n = 51	о. Уделья ДО n = 25	ОСВ n = 6	Сетон n = 24	Перифитон n = 30	Макрофиты n = 14	Ихтиофауна n = 39	МГ/КГ ЗОЛЫ	
											7-10	0-142
Mn	7-10	50 0-142	670	660 300-1000	540 100-800	2300 600-10000	2100 400-6000	1500 400-6000	1600 300-6000	90 10-300		
Fe**	410-670	970 15-2750	4,65	2-4 1-6	2-5 2-6	2-5 1-6	4-7 1-10	3-6 1-10	1-2 1-3	0,4 0,001-1		
Ni	0,3-2,5	1,5 0-4,5	95	28 10-40	20 10-30	35 20-60	19 6-30	25 6-60	6 4-10	4 4		
Cu	3-7	2,2 0,1-5,9	57	20 10-40	20 20	200 100-300	50 20-100	40 20-80	30 20-100	20 20-30		
Zn	15-20	2,1 0,1-8,3	80	80 0-300	60 30-100	410 300-600	220 30-800	170 10-800	14 6-60	120 6-300		
Sr	50-70	13 8-32	450	160 100-300	100 100	100 100	100 100-200	100 100	300 100-400	100 100-200		
Zr	0,8-2,6	0,7 0-5,3	200	370 200-600	200 100-300	200 200	140 60-200	100 60-200	30 4-80	4 3-4		
Pb	1-3	1,0 0-7,8	20	20 10-40	13 6-20	25 20-40	33 10-100	20 6-80	14 6-80	7 6-10		

Примечание: ОП – осадочные породы, ДО – донные отложения, числитель – средние значения, знаменатель – min-max интервал. \* – эмиссионно-спектральный метод анализа; \*\* – данные по Fe, кроме воды, приведены в процентах.

следует отметить, во-первых, высокие валовые содержания железа и марганца в тонкодисперсной части донных отложений по сравнению с остатком от отмучивания и донными отложениями в целом. Так, средние содержания  $Fe_2O_3$  в ВПИ и АИ составили 11,8 и 14,9% соответственно, в донных отложениях в целом и в остатке от отмучивания илов эти показатели значительно ниже (4,9 и 2,9% соответственно). Это связано прежде всего с высоким содержанием железа в продуктах выветривания и почвах водосборных частей бассейна р. Амур, его подвижностью при затоплении и паводках. Высокие содержания валового железа соответствуют преобладанию в тонкодисперсной части донных отложений хлоритов и смешаннослойных слюда-сметитовых образований, способных образовывать ассоциации с оксидами-гидроксидами железа. Максимальными содержаниями железа характеризуются ВПИ и АИ в протоке Кафа (т. 4, 12,99 и 16,16%  $Fe_2O_3$  соответственно), что связано с седиментацией взвешенного вещества в условиях медленного течения на данном участке реки. Минимальные содержания железа отмечаются в ВПИ и АИ устья р. Горин (т. 6, 10,02 и 13,85%  $Fe_2O_3$  соответственно), что соответствует значительному увеличению в них кварца и существенному уменьшению содержания слоистых силикатов.

Во-вторых, в тонкодисперсных фракциях по сравнению с остатком от отмучивания и донными отложениями в целом содержится существенно больше Cu и Zn. Средние содержания Zn в ВПИ и АИ составили 146 и 180 мг/кг, в остатке от отмучивания илов и донных отложениях – 59 и 90 мг/кг, средние содержания Cu – 41, 40, 20 и 27 мг/кг соответственно. В то же время содержание Zr и Sr в тонкодисперсных фракциях донных отложений в 2–3 раза ниже, чем в остатке от отмучивания и в донных отложениях в целом, что определяется их вхождением в состав первичных минералов. Так, средние содержания Zr в ВПИ, АИ, остатке от отмучивания и донных отложениях составили 141, 176, 371 и 367 мг/кг соответственно.

Обобщённые данные валового состава отдельных компонентов системы «вода – донные отложения – водоросли – макрофиты – ихтиофауна» р. Амур на участке от г. Благовещенск до устья реки представлены в табл. 3. Как показал анализ, в воде средние содержания большинства элементов находятся в пределах 1,5-кратных изменений средних (кларковых) содержаний элементов в речных водах

по Livingston [5]. Однако содержание марганца и железа может превышать в зависимости от фазы гидрологического режима р. Амур и водности года исследований средние (кларковые) содержания этих элементов в речных водах более чем в полтора раза. При этом средние и максимальные содержания Cu, Zn, Sr и Zr в воде существенно ниже кларковых значений.

В донных отложениях р. Амур содержания основных элементов не превышают средних значений в осадочных породах по Виноградову [6]. Речные и озёрные отложения характеризуются близким валовым составом. Следует отметить, что содержание Cu и Sr в донных отложениях, так же как и в воде, более чем в полтора раза ниже кларковых – 20 и 160 мг/кг соответственно.

Содержание микроэлементов в биологических объектах закономерно уменьшается в ряду «водоросли (сестон, перифитон) > макрофиты > ихтиофауна». Наибольшей аккумулятивной способностью по отношению к тяжёлым металлам из биологических объектов в экосистеме Амура характеризуются водоросли, а именно сестон. Так, осадок сточных вод (технический аналог сестона) по сравнению с донными отложениями в целом характеризуется большим превышением (3–5-кратным) содержания Mn, Cu и Zn относительно средних содержаний в осадочных породах – 2300, 200, 410 мг/кг соответственно. Близкими концентрациями указанных элементов характеризуется и сестон. Содержание микроэлементов в перифитоне лишь несколько ниже, чем в сестоне. В макрофитах по сравнению с сестоном наблюдается только некоторое накопление Sr – 100 и 300 мг/кг золы соответственно.

Анализ образцов донных отложений методами сканирующей электронной микроскопии свидетельствует о большом количестве в их составе диатомовых водорослей семейства *Stephanodiscus*, присутствуют также представители семейств *Synedra*, *Fragilaria*, *Eunotia* и *Diatoma* (рис. 2 а–г). В тонкодисперсных фракциях ВПИ и АИ также преобладает *Stephanodiscus* (рис. 2 д–з, 3 а). Представители основных семейств диатомовых водорослей бассейна Амура *Stephanodiscus* и *Synedra* были обнаружены и в транспортируемых речных взвесах Амура (рис. 3 б, в) и Сунгари (рис. 3 г). После выделения из донных отложений илов в составе остатка от отмучивания диагностируются только корродированные зёрна кластогенных минералов, главным образом, полевые шпаты разной степени

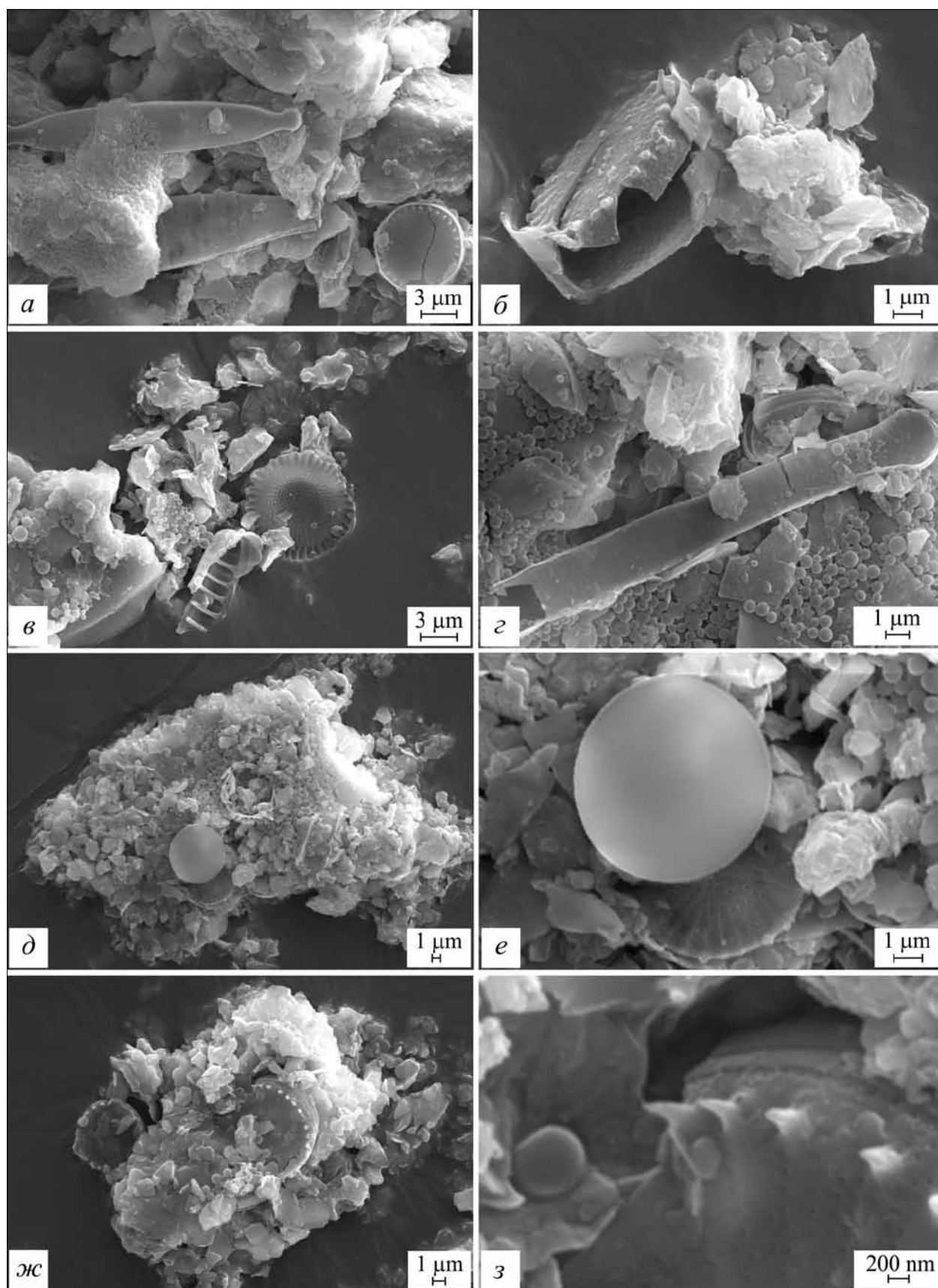
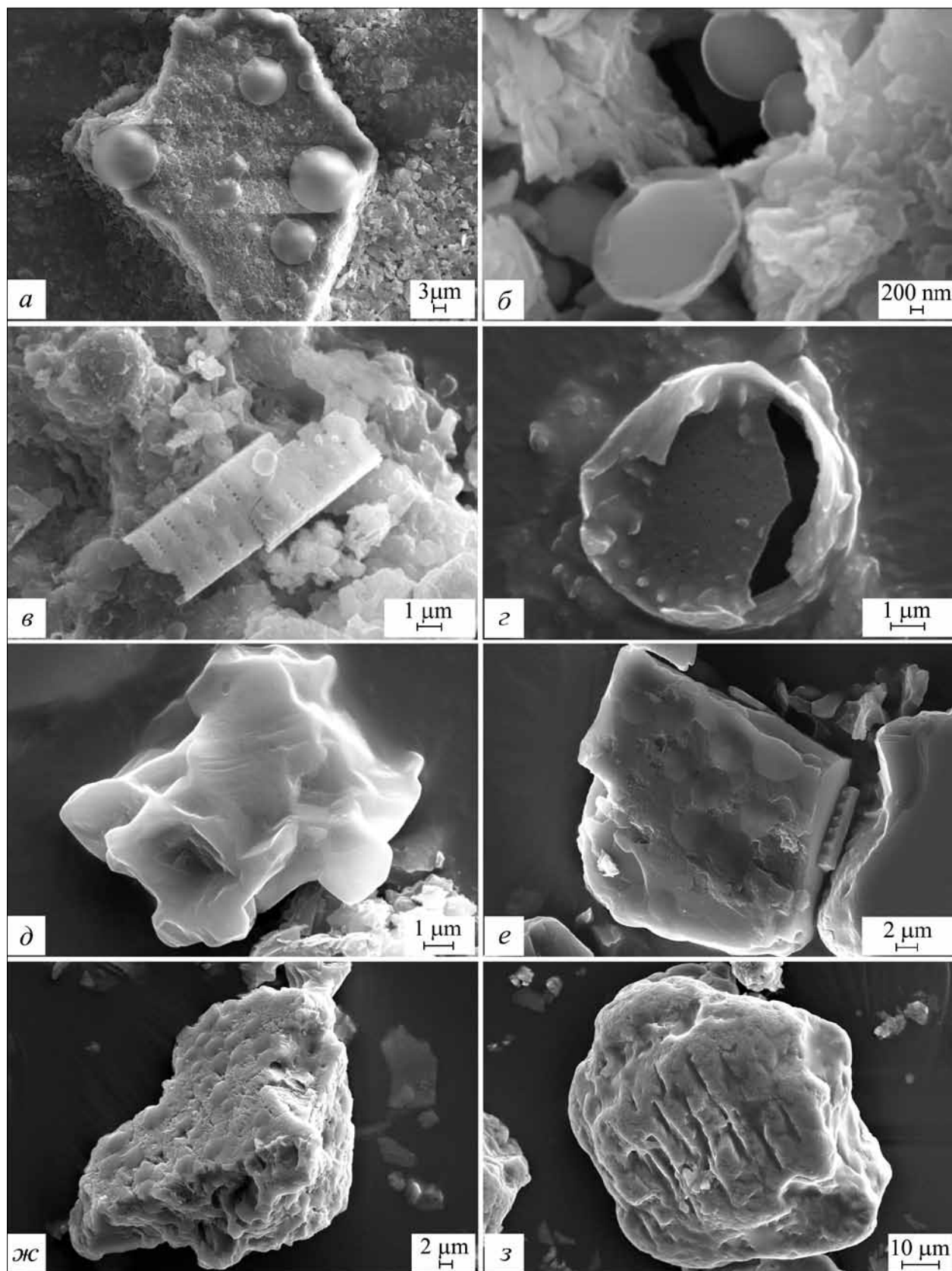


Рис. 2. Микрофотографии фракций донных отложений, т. 2: а – г – донные отложения в целом; д – з – ВПИ (растровая электронная микроскопия)



**Рис. 3.** Микрофотографии фракций донных отложений и транспортируемых речных взвесей: *а* – АИ; *б, в* – взвеси р. Амур; *г* – взвеси р. Сунгари; *д – з* – остаток от оттаивания илов (растровая электронная микроскопия)



выветрелости и дисперсности, диатомовых водорослей практически нет (рис. 3 д–з).

Известно, что диатомовым водорослям принадлежит большая роль в создании первичной продукции и в геохимических циклах элементов (кремний, углерод) [7], для их роста необходимы Mn, Fe, Cu и Zn [8]. Аккумуляция в сестоне Mn, Fe, Cu и Zn (именно эти элементы накапливаются в ВПИ и АИ донных отложений) позволяет предполагать, что накопление Mn, Fe, Cu и Zn в тонкодисперсных фракциях донных отложений может происходить за счёт их биологического накопления диатомовыми водорослями (один из возможных механизмов). Прямое определение содержания тех или иных элементов в составе диатомовых водорослей крайне затруднительно вследствие недостаточности разработанных методов анализа и способов нативного их выделения без изменения состава. Однако авторам одной из последних работ в этой области удалось решить эту задачу для клетки диатомовой водоросли *Cyclotella meneghiniana* [9]. Использование рентгенфлюоресцентной микротомографии с высоким разрешением (400 нм) позволило показать (трёхмерная карта распределения элементов в клетке) и доказать участие именно Mn, Fe, Cu и Zn в составе «живой» клетки (высушена для анализа после выделения из культуры).

Таким образом, исследования состава донных отложений р. Амур показали, что содержание макро- и микроэлементов в донных отложениях не превышает среднего содержания элементов в осадочных породах. В тонкодисперсных фракциях донных отложений (ВПИ и АИ) содержание Fe, Mn, Cu и Zn более чем в два раза выше по сравнению с донными отложениями в целом и остатком от отмучивания илов. Методами сканирующей электронной микроскопии установлено участие в составе донных отложений и их тонкодисперсных компонентов диатомовых во-

дорослей. Показаны высокая аккумулятивная способность диатомовых водорослей по отношению к Fe, Mn, Cu и Zn и участие их в составе ВПИ и АИ, что позволяет предполагать функциональную значимость диатомовых водорослей в геохимических циклах указанных элементов.

### Литература

1. Бакланов П.Я., Воронов Б.А. Глобальные и региональные риски устойчивого природопользования в бассейне Амура // Известия РАН. Сер. Геогр. 2010. № 2. С. 17–24.
2. Медведева Л.А., Сиротский С.Е. Аннотированный список водорослей реки Амур и водоёмов его приточной системы // Биогеохимические и геоэкологические исследования наземных и пресноводных экосистем. Вып. 12. Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 130–215.
3. Чижилова 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.
4. Махинов А.Н., Чалов Р.С., Чернов А.В. Размыты берегов на Среднем Амуре // Геоморфология. 2001. № 2. С. 72–81.
5. Livingston D.A. Chemical composition of rivers and lakes: Data of geochemistry // U.S. Geol. Survey Profess. 1963. Paper 440G. P. G1–G64.
6. Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
7. Brzezinski M.A. Mining the diatom genome for the mechanism of biosilification // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2008. V. 105 (5). P. 1391–1392.
8. Round F.E., Crawford R.M., Mann D.G. The diatoms: Biology and morphology of the genera. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 747 p.
9. De Jonge M.D., Holzner C., Baines S.B. *et al.* Quantitative 3d elemental microtomography of *Cyclotella meneghiniana* at 400-nm resolution // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2010. V. 107 (36). P. 15676–15680.