

Янин Е.П. Формирование и геохимические особенности техногенных речных илов (на примере рек Инсар и Алатырь, Республика Мордовия) // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2007, № 7, с. 71–86.

Введение

В промышленно-урбанизированных районах в аллювиальном седиментогенезе участвуют значительные массы техногенного вещества, что приводит к формированию в реках нового типа осадочных образований – техногенных илов. Илы являются концентраторами различных поллютантов, играют роль источника вторичного загрязнения водной массы, оказывают токсическое действие на живые организмы и во многом определяют эколого-геохимические особенности рек в зонах техногенного загрязнения. Оценка экологического состояния речных систем в таких районах должна проводиться с учетом масштабов распространения техногенных илов, их строения, вещественного состава и геохимических свойств.

С этой точки зрения интерес представляет изучение состава и свойств техногенных отложений в структуре типичного для городских ландшафтов сопряжения: а) осадки сточных вод (ОСВ), образующиеся на очистных сооружениях (главном источнике поставки техногенного вещества в реку) и представляющие собой геохимический аналог техногенных илов; б) взвесь, поступающая в реку в составе сточных вод (основной поток вещества, участвующего в формировании илов); в) техногенные илы, формирующиеся в речном русле. Подобное сопряжение и было использовано автором для исследований, результаты которых излагаются ниже.

Район и методика исследований

Исследования проводились на реках Инсар и Алатырь в зоне влияния г. Саранска – крупного промышленного центра России. Длина Инсара – 168 км, площадь бассейна – 4020 км², многолетний средний расход воды в районе Саранска – 6 м³/с. Питание реки в основном снеговое, определенное участие в нем принимают грунтовые и дождевые воды, а также сточные воды, доля которых в речном стоке составляет не менее 20–25%.

Основной объем стоков, образующихся в г. Саранске, сбрасывается в Инсар с городских очистных сооружений (ГОС); в меньшем (на порядок) количестве они поступают в реку с заводских локальных очистных сооружений (ЛОС) по р. Лепелейке и руч. Никитинскому. В 75 км ниже г. Саранска Инсар впадает в р. Алатырь (левый приток Суры, бассейн Волги). Длина Алатыря – 296 км, площадь бассейна – 11,2 тыс. км², средний годовой расход воды – 40 м³/с.

Пробы ОСВ (слой 20-60 см) отбирались на иловых площадках, расположенных вблизи ГОС. На ЛОС основных предприятий г. Саранска были отобраны пробы промышленных шламов (ПШ), образующихся при очистке производственных стоков. Пробы фоновых почв и руслового аллювия (слой 0–20 см) отбирались в верховьях Инсара, где отсутствуют техногенные источники загрязнения. В пределах г. Саранска отбор проб техногенных илов (верхний слой, 0–30 см) осуществлялся с шагом 250 м. На опорных участках русла р. Инсар илы опробовались на всю мощность их залегания: участок I – ниже р. Лепелейки (принят за нулевую отметку, далее указаны расстояния от него); II – центр Саранска (8 км); III – ниже руч. Никитинского (11 км); IV – выше ГОС (17 км); V – 0,2 км ниже ГОС (19,5 км), VI – 24 км; VII – 30 км, с. Мал. Елховка, VIII – 38 км, с. Шувалово, IX – 49 км, пос. Ромоданово, X – 62 км, с. Пушкино, XI – 92 км, устье Инсара; участок XII – р. Алатырь (140 км). Пробы отложений отбирались с помощью бура ТБГ-1 (ОСВ, илы) и пластикового совка (верхний горизонт почв, фоновый аллювий, ПШ) в полотняные мешочки, высушивались на воздухе (в тени), просеивались через сито (1 мм) и помещались в бумажные пакеты. Для получения взвеси сточных вод (ВСВ) в устье канала, по которому стоки с ГОС поступают в р. Инсар, в полиэтиленовые бочки отбирались (7 дней подряд в летнюю межень) пробы воды объемом 120 л; пробы отстаивались в течение суток; затем вода сливалась при помощи сифона; осадок (ВСВ) высушивался на воздухе и помещался в стеклянные бюксы.

Химико-аналитические исследования проб выполнялись следующими методами: валовые концентрации Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Ag, Cd, Pb, Bi – атомной абсорбцией; Hg – беспламенной атомной абсорбцией; Tl – экстракционно-фотометрическим; B, F, Ti, V, As, Zr, Sn, Sb, Ba, W – количественным эмиссионным спектральным; Be, P, Sc, Ga, Y, Nb, Yb – приближенно-количественным эмиссионным спектральным методом. Извлечение подвижных форм металлов из отложений осуществлялось ацетатно-буферной смесью, их определение в вытяжках – атомной абсорбцией. Компоненты петрохимического состава отложений исследовались по стандартным методикам. Гранулометрический анализ илов (слой 20–60 см) и аллювия осуществлялся водно-ситовым методом. Результаты всех анализов даются на сухую массу образца.

Статистическая обработка фактического материала заключалась в расчете среднего содержания химических элементов; коэффициента концентрации химического элемента (K_C), который характеризует интенсивность его накопления (относительно фонового содержания) в изученном компоненте; суммарного показателя загрязнения (Z_C), представляющего сумму K_C элементов и отражающего аддитивное превышение фонового уровня группой (ассоциацией) химических элементов [1], а также петрохимических модулей и гранулометрических коэффициентов [2, 3].

Русловой аллювий и его особенности в фоновых условиях

Русло Инсара в пределах его фоновых участков выстлано в основном среднезернистыми песками, характеризующихся преобладанием фракции 0,5–0,25 мм (более 50%) и небольшим содержанием глины (доля частиц размером $< 0,001$ мм – не более 1%); количество физической глины (фракции $< 0,01$ мм) в среднем составляет 3,5%. В отложениях встречаются гравий, галька, дресва, щебень. Данный состав является следствием в основном механического накопления природного осадочного материала и формированием литогенной фации аллювия, состав и геохимические особенности которого типичны для русловых отложений рек, не испытывающих техногенного воздействия [4].

Действительно, петрохимический состав фонового аллювия Инсара хорошо соотносится с составом четвертичных песчаных пород Русской равнины и местных почв, являющихся одним из основных природных источников питания рек осадочным материалом (табл. 1). Определенные различия проявляются в большем содержании оксидов Са и Mg и в меньшем – оксидов К и Mn в четвертичных отложениях, в повышенных концентрациях оксида Fe в аллювии и органического вещества в почвах. В сравнение с почвами аллювий обогащен SiO_2 (преобладание в минеральном составе кварца), СаО и карбонатами (влияние карбонатных пород), обеднен Al_2O_3 и TiO_2 (невысокое содержание глинистых минералов). Содержания большинства изученных химических элементов в аллювии близки их уровням в фоновых почвах и параметрам глобальной распространенности (табл. 2). Фиксируемые отклонения от глобальных параметров объясняются особенностями местных пород и условиями формирования руслового аллювия.

Таблица 1. Химический состав различных отложений, %

Ком- по- нент	ЧПП	ФП	ФА	ОСВ	ВСВ	Техногенные илы, участки									
						II	IV	VI					VIII	X	
								Слой опробования, см							
						0-10	0-20	20-60	–	20-60	0-20	20-60	60-120	120-180	180-240
SiO ₂	73,58	73,69	81,63	23,87	28,3	56,86	48,58	44,50	62,32	58,42	57,64	59,24	64,35	62,56	57,42
TiO ₂	0,34	0,54	0,33	0,25	0,40	0,62	0,58	0,58	0,64	0,64	0,60	0,61	0,59	0,53	0,57
Al ₂ O ₃	6,55	6,41	5,22	4,70	5,50	10,86	10,15	10,05	10,52	10,98	11,00	10,64	9,92	8,87	9,16
Fe ₂ O ₃	2,10	2,59	4,03	1,04	4,16	4,86	3,23	3,22	4,24	3,73	3,93	4,72	5,17	3,79	3,75
FeO	0,94	0,47	0,57	3,00	3,20	2,16	2,66	2,65	1,36	2,66	3,74	2,30	1,41	1,94	2,16
MnO	0,044	0,20	0,078	0,04	–	0,141	0,049	0,048	0,075	0,079	0,076	0,070	0,057	0,071	0,095
CaO	5,23	0,47	0,78	8,00	8,14	2,66	2,12	4,10	2,20	2,20	1,80	1,72	1,72	1,90	5,43
MgO	1,94	0,70	0,37	1,40	2,32	1,31	0,94	0,92	1,16	1,36	1,05	1,05	0,84	0,84	1,00
Na ₂ O	0,30	0,55	0,56	0,58	0,88	0,84	0,90	0,90	0,98	0,92	0,95	1,00	1,00	0,80	0,97
K ₂ O	0,30	1,48	1,05	0,84	1,15	1,89	1,89	1,87	1,89	1,89	2,10	2,10	1,89	1,73	1,89
P ₂ O ₅	0,098	0,14	0,19	3,00	–	0,36	1,00	0,99	0,49	0,62	0,38	0,33	0,25	0,45	0,49
H ₂ O ⁻	–	4,98	1,37	4,81	–	3,66	3,99	4,50	2,50	2,58	1,82	2,44	2,18	2,30	2,40
ППП	2,22	7,20	3,66	46,08	41	12,68	21,82	25,79	10,48	12,23	13,37	12,01	9,88	11,29	14,31
S _{общая}	–	<0,10	<0,10	1,79	–	0,17	0,58	0,11	0,17	0,32	0,16	0,37	0,58	0,68	0,28
CO ₂	3,89	0,22	0,66	2,75	–	1,43	0,99	1,29	1,32	1,32	0,77	0,66	0,66	1,20	4,16

Примечание. Здесь и далее в таблицах: ЧПП – четвертичные песчаные породы Русской платформы [5]; ФП – фоновые почвы; ФА – фоновый аллювий; ОСВ – осадки сточных вод; ВСВ – взвесь сточных вод; ППП – потери при прокаливании; расположение участков – см. в тексте.

Таблица 2. Химические элементы в ФП, ФА, ОСВ и техногенных илах, мг/кг

Эле- мент	Бассейн р. Инсар							Почвы мира [6]	Кларк земной коры [7]
	ФП	ФА	ОСВ	Техногенные илы, участок VI, слой, см					
				0-20	20-60	60-120	120-180		
Be	0,4	1,1	6,1	2,5	2,5	2,1	2	0,3	3,8
B	54	32	35	50	50	50	30	20	12
F	310	350	500	450	400	385	380	200	660
P	825	950	3300	800	750	680	650	800	930
Sc	2,1	4	2,6	2	2	2	3	7	10
Ti	3360	3600	2500	2800	3000	3000	4000	5000	4500
V	80	85	56	155	150	100	400	90	90
Cr	49	62	1900	800	600	400	300	70	83
Mn	1200	770	610	1100	1000	500	300	1000	1000
Co	21	9	8,4	17	15	10	20	8	18
Ni	26	35	690	175	150	100	150	50	58
Cu	50	41	1700	1100	1000	400	400	30	47
Zn	85	50	4500	1100	1000	600	200	90	83
Ga	21	11	5	30	30	20	40	20	19
As	6,4	7	9	8	8	7	6	6	1,7
Y	11	10	12,6	10	10	10	8	40	29
Zr	75	86	100	75	80	100	50	400	170
Nb	5	6	4,5	4,5	5	3	5	10	20
Mo	0,7	2	56	85	80	20	100	1,2	1,1
Ag	0,05	0,08	7,6	1,7	1,5	0,5	0,8	0,05	0,07
Cd	0,34	0,14	40	22	20	15	20	0,35	0,13
Sn	2,4	2	400	85	80	50	40	4	2,5
Sb	1	0,9	16	4,5	4	3	3	1	0,5
Ba	210	210	270	100	100	100	400	500	650
Yb	1	1	1	1	1	1	1	3	3,3
W	1,5	1,3	54	32	30	15	15	1,5	1,3
Hg	0,06	0,02	4	0,35	0,3	0,25	0,25	0,06	0,083
Tl	0,19	0,13	0,26	0,22	0,22	0,21	0,19	0,2	1
Pb	15	17	240	60	50	50	150	15	16
Bi	0,15	0,25	15,2	1,2	1	0,5	1	0,2	0,1 *

* По А.Е. Ферсману.

Источники техногенного осадочного материала

В зоне влияния г. Саранска техногенный осадочный материал поступает в р. Инсар со сточными водами и с поверхностным (дождевым и талым) стоком с городской территории, загрязненной промышленными выбросами. Зональный модуль стока наносов для естественных условий бассейна Инсара оценивается в $0,6 \text{ г/с/км}^2$. Существующие в Саранске ГОС и ЛОС длительное время функционируют с перегрузкой, что обуславливает высокие содержания взвешенных веществ в сточных водах, поступающих в Инсар. В пределах города модуль стока наносов (только с учетом дополнительной их поставки со стоками) возрастает до $2,4 \text{ г/с/км}^2$. Расчеты показывают, что со сточными водами в Инсар поступает не менее 5 тыс. т/год твердого материала.

На очистных сооружениях г. Саранска образуется около 25 тыс. т/год ОСВ (на сухую массу), которые размещаются на иловых площадках вблизи ГОС [8]. ОСВ отличаются от природного аллювия, фоновых почв и осадочных пород меньшим количеством SiO_2 , большим содержанием органического вещества, повышенными концентрациями серы, P_2O_5 , FeO , CaO и бикарбонатов кальция (см. табл. 1). Это является следствием условий образования осадков в ходе очистки сточных вод, применения препаратов для дезинфекции последних и обеззараживания ОСВ (негашеная и хлорная известь, гипохлорит кальция) и подпитки микроорганизмов в биопрудах (суперфосфат). ОСВ характеризуются высокими концентрациями многих химических элементов, которые заметно превышают фоновые уровни в аллювии и почвах (см. табл. 2).

Специфическим петрохимическим составом обладают промышленные шламы (табл. 3). В то же время их средний состав неплохо соотносится (по основным компонентам) со средним составом ОСВ, что закономерно, поскольку на ГОС осуществляется совместная очистка бытового стока и производственных сточных вод. В свою очередь, химический состав ВСВ, поступающей в р. Инсар, практически идентичен составу ОСВ (см. табл. 1). Наблюдаемые различия обусловлены разубоживанием техногенной взвеси природным материалом, а также являются следствием более окисленной обстановки, характерной для условий сбросного канала, по которому стоки поступают в р. Инсар. Это, в частности, проявляется в увеличении во взвеси содержаний Fe_2O_3 , превышающих концентрации FeO , в возрастании количества SiO_2 , в уменьшении содержания органики. Техногенная взвесь отличается высокими концентрациями многих элементов, которые интенсивно накапливаются в ОСВ и ПШ (табл. 4).

Таблица 3. Химический состав промышленных шламов, %

Ком- понент	Завод, предприятие *								Сред- нее
	1	2	3	4	5	6	7	8	
SiO ₂	2,43	6,33	2,72	1,50	19,99	59,14	65,83	6,50	20,6
TiO ₂	0,04	0,03	0,02	0,03	0,15	0,28	0,36	0,04	0,12
Al ₂ O ₃	1,17	1,62	0,50	2,20	2,22	4,60	6,45	0,70	2,44
Fe ₂ O ₃	3,26	3,75	1,39	0,34	28,31	3,60	3,84	1,02	5,69
FeO	0,21	0,14	0,10	< 0,10	–	–	–	–	–
MnO	0,04	0,03	0,21	0,01	0,15	0,05	0,05	0,02	0,07
CaO	28,26	32,03	41,96	28,10	10,68	8,93	5,85	4,00	19,98
MgO	16,88	10,54	6,72	25,70	6,75	2,92	1,51	0,40	8,93
Na ₂ O	0,50	0,25	0,35	0,20	0,60	0,50	0,60	0,50	0,44
K ₂ O	0,10	0,10	0,15	0,10	0,10	0,90	1,20	0,20	0,37
P ₂ O ₅	2,86	1,50	4,24	0,04	8,80	0,36	0,19	3,50	2,69
H ₂ O ⁻	5,66	7,46	3,30	4,70	6,60	1,40	1,42	6,20	4,59
ППП	33,68	31,67	36,00	34,14	12,84	16,82	12,20	75,50	31,61
S _{общая}	1,98	-	1,37	0,39	0,68	< 0,10	-	0,86	0,66
CO ₂	17,60	17,16	27,28	17,16	3,52	8,14	4,18	0,22	11,90

* 1 – полупроводниковых изделий, 2 – СИС-ЭВС (специальных источников света и электровакуумного стекла), 3 – электроламповый, 4 – точных приборов, 5 – резинотехнических изделий, 6 – автокомбинат, 7 – автотранспортное предприятие, 8 – мясокомбинат.

Определенным источником поступления техногенного материала в водотоки является поверхностный сток с городской территории. В существенной мере состав этого материала формируется при участии промышленных пылевых выбросов, осаждающихся на подстилающие поверхности (городские почвы). В г. Саранске практически все виды промышленной пыли, поступающей в городскую среду, характеризуются присутствием широкого комплекса химических элементов, уровни содержания которых многократно превышают их концентрации в фоновых почвах [9]. Промышленная пыль отличается от фоновых почв высокими содержаниями Fe, оксидов Ca и Mg. Выпадение пыли способствует изменению химического состава городских почв, для верхних горизонтов которых характерно пониженное содержание SiO₂, повышенные количества Al₂O₃, соединений Fe, Ca и Mg, органики. В почвах города развиты техногенные аномалии Pb, Cd, Cu, Zn, Mo, Sn, Hg.

Таблица 4. Ассоциации химических элементов в промышленных шлаках, ОСВ и ВСВ

Завод, предприятие	Химические элементы и порядок значений их K_C (рассчитано относительно содержаний в ФА)						
	> 1000	1000-300	300-100	100-30	30-10	10-3	3-1,5
Полупроводниковых изделий	Sn-Au-Ag	–	F	Ni-Cu-Mo-Cr-Zn-Pb-Cd-Bi	W-P	B	Co
СИС-ЭВС	–	Zn-F-Cu	Ni-Mo	Pb	Cr-W-P	Ag-Cd-Be-Sb	Sn-B
Электроламповый	Hg-Mo	Sb-Cd-Ni-Cu-W	Ag	Sn-Pb-Bi	Tl-Cr-P-F-B	Zn	Ba-Mn
Точных приборов	Au	–	W-Sn-F	–	Ni	Mo-Cu-Sb	Pb-Ag
Электровыпрямитель	Mo-Cd	Sn-Ag	Cu-Zn-Bi	Ni-W-F	P-Cr	B-Pb-Sb	Co
Резинотехнических изделий	Cu	–	Zn	P	Cd-Sn-Cr-Pb-Ge-Ni-Mo-Ag-Bi	F-Fe-Sb	W-B-Co
Инструментальный	–	Sn-Cr	Mo	Cu	F-Ni	Pb-Ag-W	B
Механический	–	Sn-Cr-Pb	Cd-Ag-Cu	Mo-Bi-Zn-P-Sb	W-F-Ni	–	–
Мясокомбинат	–	–	–	Cu	Sn-P-Zn-Cd	Be	Mo-F-Ag-W-Pb
Автокомбинат	–	–	–	–	Cd-Pb-Sn	Cu-Zn-Ag-Be-Sb-Mo-W-F	–
Автотранспортное	–	–	–	–	Sn	Pb-Mo-W-Hg-Ag-Cu	Zn-B-Cr
ОСВ	–	–	Cd-Sn-Hg	Ag-Zn-Bi-W-Cu-Cr	Mo-Ni-Sb-Pb	F-Be	Sr-Tl-U
ВСВ	–	–	Cd-Mo-Sn	Ag-Zn-Hg-Bi	Cu-W-Cr	Ni-P-Pb-Sb	As-Be-F

В то же время в Саранске отсутствует ливневая канализация, что заметно снижает вклад поверхностного стока в поставку твердых наносов в реку, поскольку значимая часть их остается в местных понижениях рельефа и на пойме Инсара. В пределах Саранска существуют значительные по площади участки, не имеющие водонепроницаемого покрытия, что не способствует образованию поверхностного стока. Большая часть центральной (наиболее благоустроенной) части города дренируется р. Саранкой, регулируемой прудами, перехватывающими наносы.

Таким образом, материальной основой техногенных илов является осадочный материал, поступающий со сточными водами преимущественно с ГОС, в меньшем количестве с ЛОС и с поверхностным стоком с территории города. При этом техногенный материал, поступающий с городскими сточными водами, определяет важнейшие характеристики техногенных илов, геохимическим аналогом которых являются ОСВ.

Строение и морфологические особенности техногенных илов

В зоне влияния г. Саранска техногенные илы выстилают значительную часть русла Инсара, причем в черте города их вертикальная мощность изменяется от 0,2–0,3 до 1–1,2 м; ниже ГОС она достигает 2–3,5 м (рис. 1).

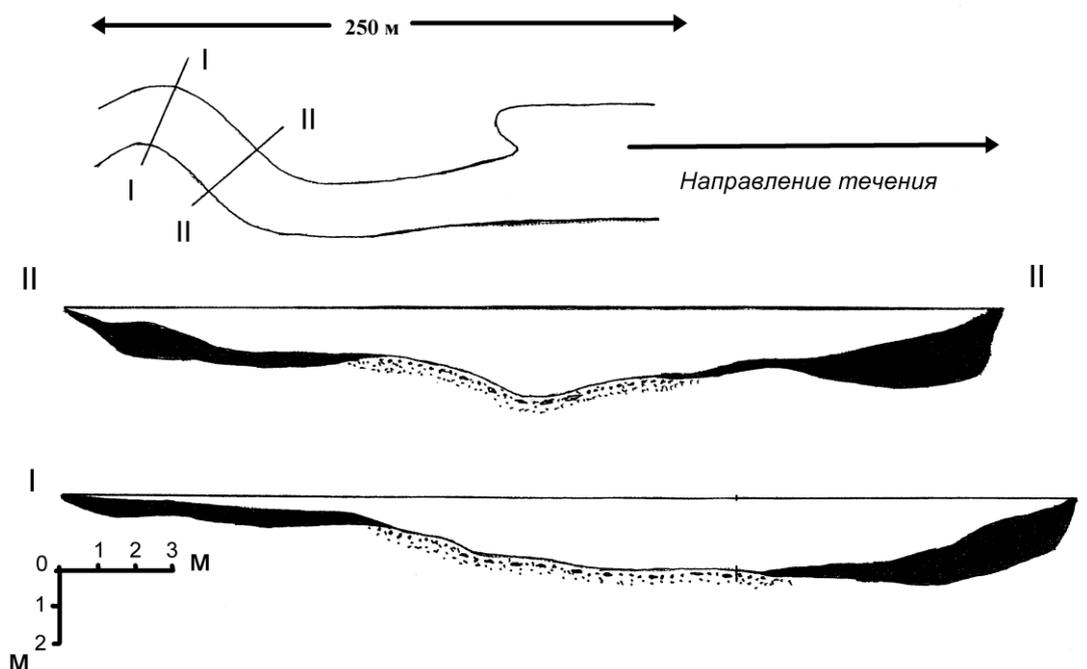


Рис. 1. Поперечный профиль через русло Инсара, участок VIII (темным цветом показаны техногенные илы; прочее – песчаные отложения с включениями частиц техногенного ила).

Илы (мощностью до 1,2–1,5 м) в виде линз и грядоподобных образований прослеживаются до устья Инсара, формируют прибрежные отмели, небольшие осередки, накапливаются в затонинах, плесовых лощинах, в местах развития макрофитов, тонким слоем (в 2–5 см) перекрывают прибрежные песчаные отмели. В устье Инсара илы образуют конус выноса, где их вертикальная мощность составляет 0,8–1,2 м. Общий объем техногенных илов в русле Инсара оценивается в 0,8–0,9 млн. м³. Илы развиты и в р. Алатырь, где они встречаются на прирусловых отмелях, в затонинах; даже в 50–70 км ниже устья Инсара (участок XII) илы прослеживаются в виде линзообразных скоплений мощностью до 1–1,2 м у берегов, нередко выстилают основное русло (слоем 20–30 см), являются наполнителем в песчаных отложениях.

Техногенные илы представляют собой темно-серые или черные песчано-алевритоглинистые отложения с обилием органического вещества. Они отличаются специфическим (обычно химическим) запахом. В местах своего максимального накопления илы обладают определенной стратификацией. Верхний слой илов (~ 0–20 см) представляет собой хлопьеобразную суспензию, иногда жидкотекучую массу органоминерального состава. Поскольку объем жидкости, приуроченной к этому слою, превышает объем твердого материала, то подобное образование может быть названо коагелем, формирование которого приводит к тому, что поверхность раздела между водной массой и собственно донными отложениями выражена недостаточно четко. Судя по всему, в этом слое активно идут процессы коагуляции и образования различных соединений и комплексов, в которых участвуют вновь осаждающееся вещество и влекомые наносы, относительно прочно захватываемые структурой коагеля. Здесь же активно протекают процессы сорбции, что приводит к увеличению скорости окисления органического вещества. Постоянное вхождение в данный слой транспортируемых потоком взвешенных частиц снижает их кинетическую устойчивость, приводит к развитию адгезии и самопроизвольному укрупнению, осаждению даже очень тонких из них и, как следствие, к дальнейшему агрегированию и связыванию накапливающихся в русле илов. В следующем слое (~ 20–60 см) вязкость илов возрастает, пористость их уменьшается, а твердое вещество здесь уже преобладает над жидкостью. Тем не менее наличие в отложениях достаточного количества воды мешает контакту их отдельных частиц, что обуславливает формирование ячеисто-хлопьевидной («кашеобразной») структуры илов, обладающих, как правило, вязкотекучей консистенцией. Еще ниже, в слое 60–70 – 100–120 см, наблюдаются менее обводненные, более агрегированные и более плотные илы, преимущественно с липкопластичной консистенцией. В слоях ниже 110–120 см из-за гравитационного уплотнения и потери свободной, рыхлосвязанной и отчасти коллоидно-

связанной воды и снижения содержания органических веществ пористость илов уменьшается; происходит перегруппировка твердых частиц и формирование более крупных агрегатов, в результате чего илы становятся более плотными и приобретают вязкопластичную консистенцию, а твердая фаза отложений уже преобладает над жидкой.

Илы обладают липкостью и пластичностью, что свидетельствуют о наличии значительных сил молекулярного притяжения между слагающими их частицами, обуславливающих, в свою очередь, связность и повышенную устойчивость отложений к размывающему действию водного потока, а также малую величину скорости фильтрации через их толщу. Природа липкости и пластичности илов обусловлена присутствием в них коллоидных пленок, нефтепродуктов, синтетических масел, ПАУ, СПАВ, жиров, азотистых соединений, волокон. Илы – как вещество – очень агрессивны в отношении некоторых материалов (например, оказывали разъедающее действие на резиновую лодку). Взмучивание илов сопровождается газовыделением и появлением на водной поверхности ирризирующих, маслянистых пленок, а в стеклянной емкости с подобной водой после ее отстаивания наблюдается эффект Тиндаля.

Таким образом, в ходе осадконакопления в толще илов формируются определенные стратификационные макрослои, в пределах которых нередко наблюдается своеобразная неупорядоченная микротекстура. При удалении от города в илах встречаются прослойки песков, иногда илы перекрыты слоем (до 0,2–0,4 м) песчаных отложений. Это указывает на трансседиментацию техногенного материала в речном русле, которая, очевидно, активно происходит в периоды половодий, когда эрозионно-транспортная способность потока существенно увеличивается. На спаде половодий, когда гидравлические характеристики потока становятся меньше, начинается осаждение переносимых рекой наносов и процессы илообразования вновь интенсифицируются.

Гранулометрические особенности техногенных илов

Техногенные илы характеризуются своеобразным гранулометрическим составом. Так, если в фоновом аллювии доля алевритовых частиц составляет 3,5%, то в илах она превышает 30–50%; доля глины в аллювии ничтожна (не более 2%), в илах – 20–25%. Особенностью илов является высокое количество (в 10–20 раз больше, нежели в аллювии) частиц, отвечающих физической глины (табл. 5).

Различия гранулометрического состава фоновой аллювии и техногенных илов наглядно иллюстрируются значениями соответствующих показателей (табл. 6).

Таблица 5. Гранулометрический состав фонового аллювия и техногенных илов

Уча- сток	Фракции, мм, %									
	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,10	0,10-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	< 0,001	< 0,01
	Песок				Алеврит		Глина		Физическая глина	
	крупный		средний	мелкий	тонкий	крупный	мелкий	крупная		тонкая
ФА	1,2	19,2	51,6	16,2	5,8	2,5	1,7	1,1	0,7	3,5
I	0,1	2,0	15,5	12,0	17,1	25,6	3,2	14,14	10,1	27,4
II	0,1	1,6	9,0	6,7	13,1	37,3	10,3	16,0	6,0	32,3
III	1,0	8,5	30,3	10,5	14,7	19,4	3,7	9,0	2,9	15,6
IV	0,2	1,1	5,7	21,8	32,8	12,6	2,6	16,7	6,5	25,8
V	0,1	2,2	23,0	17,6	14,7	17,7	6,4	11,9	6,4	24,7
VI	0,1	0,4	4,1	6,4	17,0	42,0	9,7	14,6	5,7	30,0
X	0,3	0,7	5,4	13,4	38,8	24,2	5,5	9,5	5,2	20,2
XII	0,1	0,1	4,2	47,9	32,8	3,7	1,7	3,9	5,6	11,2

Таблица 6. Гранулометрические показатели фонового аллювия и техногенных илов

Уча- сток	Медианный диаметр, Q_{50}	Q_{90}/Q_{10}	Коэффициент сор- тированности, S_o	Коэффициент асимметрии, S_k	Коэффициент дисперсности *
ФА	0,220	8,5	2	1,06	0,04
I	0,020	470	35	0,55	0,38
II	0,015	313	11	0,80	0,48
III	0,075	88	17	0,69	0,19
IV	0,049	207	17	0,16	0,35
V	0,053	333	20	0,40	0,33
VI	0,015	106	4	0,66	0,43
X	0,035	90	8	0,52	0,25
XII	0,078	41	3	0,92	0,11

* Отношение количества физической глины к содержанию остальных фракций.

Так, медианный диаметр частиц ила в 3–10 раз меньше, чем у аллювия, для которого значения этого параметра близки среднему показателю для данного географического района. Например, медианный диаметр руслового аллювия рек центральных районов Русской равнины составляет 0,30–0,40 мм; коэффициент сортировки – 1,23–1,32 [10]. Илы отличаются высоким значением коэффициента дисперсности (на порядок больше, чем у фонового аллювия). Если аллювий характеризуется средней сортировкой, то илы, особенно в ближней к городу зоне, сортированы плохо, что подтверждается и высокими значениями отношения Q_{90}/Q_{10} . Илы представляют собой связанные пластичные грунты (Q_{50} очень редко превышает 0,05 мм, а если и превышает, то незначительно), фоновый аллювий – это несвязанный грунт (Q_{50} много больше 0,05 мм). Коэффициент асимметрии S_k фонового аллювия больше единицы, илов – всегда меньше единицы.

Фоновый аллювий Инсара отличается одновершинной кривой распределения частиц с выраженной асимметрией, что является следствием преобладания в нем фракций 0,5–0,25 мм. Это свидетельствует о ведущей роли одного источника поступления наносов в водоток (почвы и породы водосбора). Совершенно иным обликом таких кривых характеризуются техногенные илы (рис. 2). Считается, что многовершинные кривые распределения типичны для отложений, сложенных генетически разнородными образованиями. В нашем случае это указывает на то, что в сложении илов принимают участие как природный, так и техногенный осадочный материал. При удалении от города облик кривых распределения приобретает выраженный одновершинный характер, а в пределах участка XII кривая распределения становится одновершинной и похожей на тако-

вую для фонового аллювия. Действительно, по мере удаления от города наблюдается увеличение медианного диаметра частиц и степени сортировки илов, снижение содержания в них физической глины и уменьшение коэффициента дисперсности, что указывает на процессы их переотложения и разубоживания природным аллювием. В целом фоновый аллювий отвечает (по относительному содержанию физической глины или значениям медианного диаметра) гранулометрическому классу отложений, характеризуемых как типичный песок, а техногенные илы (по тем же показателям) – как песчанистый или мелкоалевритовый ил.

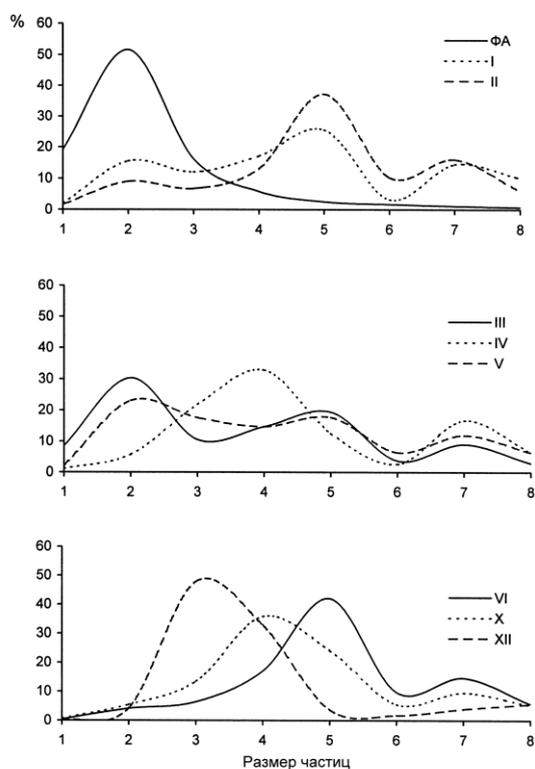


Рис. 2. Кривые распределения частиц различного размера в фоновом аллювии (ФА) и техногенных илах (участки I-XII, расположение см. в тексте): % – доля фракции; размер частиц, мм: 1 – 2–1; 2 – 1–0,5; 3 – 0,5–0,25; 4 – 0,25–0,10; 5 – 0,10–0,05; 6 – 0,05–0,01; 7 – 0,01–0,005; 8 – 0,005–0,001; 9 – < 0,001.

Химический состав и геохимические особенности техногенных илов

Техногенные илы отличаются от фонового аллювия существенно меньшим количеством SiO_2 , более высокими содержаниями органики, Al_2O_3 , CaO , соединений Fe, бикарбонатов и других компонентов. Петрохимические модули указывают на то, что вещественной основой илов является осадочный материал, поступающий в реку со сточными водами (табл. 7).

Таблица 7. Петрохимические модули различных отложений

Модуль	ЧПП	ФП	ФА	ОСВ	ВСВ	Техногенные илы, участок VI, слой, см				
						0-20	20-60	60-120	120-180	180-240
$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO} / \text{SiO}_2$	0,08	0,08	0,07	0,14	0,27	0,22	0,15	0,18	0,20	0,18
$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$	0,05	0,05	0,04	0,12	0,12	0,13	0,10	0,11	0,11	0,11
$\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$	19	19,4	26,5	8,6	8,7	7,5	10,1	9	8,9	9,5
$\text{SiO}_2 / \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	153	50	66	21	17	21	29	28	26	26
$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	0,048	0,048	0,038	0,10	0,10	0,12	0,09	0,10	0,10	0,10
$\text{FeO} / \text{Fe}_2\text{O}_3$	0,99	0,40	0,30	6,6	1,7	1,8	0,7	1,6	2,1	1,1
$\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{FeO}$	1,02	2,4	3,3	0,2	0,6	0,6	1,4	0,6	0,5	0,9
$\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO} / \text{SiO}_2$	0,02	0,02	0,02	0,12	0,15	0,08	0,04	0,06	0,08	0,06
ППП / SiO_2	0,03	0,1	0,04	1,9	1,5	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2
$\text{SiO}_2 / \text{R}_2\text{O}_3$	15,8	15,5	17,8	7,6	5,9	6,2	8	7,4	7,3	7,4
CaO / MgO	1,9	0,5	1,6	4,1	2,6	3,3	1,4	4,5	1,2	0,5

Так, отмечаются близкие значения многих модулей, с одной стороны, для техногенных образований (ОСВ, ВСВ, илы), с другой – для аллювия, почв и четвертичных песчаных пород Русской платформы.

Основная толща техногенных илов, как правило, характеризуется относительно стабильным петрохимическим составом, хотя существующая стратификация вносит определенные коррективы (см. табл. 1). В частности, для верхнего слоя илов характерны более высокие содержания органики, СаО, несвязанной воды и пониженные – SiO₂. В нижних слоях илов увеличиваются содержания серы и уменьшаются количества СаО и бикарбонатов; для закиси Fe и P₂O₅ фиксируется неоднородное распределение. Вниз по течению химический состав илов, при сохранении его своеобразия, претерпевает определенные, но вполне закономерные изменения, проявляющиеся в увеличении SiO₂, снижении органических веществ и Al₂O₃. Это обусловлено привнесом более грубых осадочных частиц и диагенетическими процессами, способствующими разрушению сорбционно-карбонатных новообразований и преобразованию гидроксидов Fe.

Техногенные илы являются концентраторами основной массы химических элементов, поступающих в реку со сточными водами и поверхностным стоком с освоенных территорий. Как правило, геохимические ассоциации, свойственные илам, по своим качественным (набору химических элементов) и количественным (относительному положению элементов в ранжированном по значениям K_C ряду) параметрам близки ассоциациям, установленным для ОСВ и ВСВ, и включают элементы, интенсивно концентрирующиеся в промышленных шламах, промышленной пыли, почвах города (табл. 8).

Таблица 8. Геохимические ассоциации в техногенных илах

Уча- сток	Химические элементы и порядок значений их K_C					Z_C
	>100	100-30	30-10	10-3	3-1,5	
I	Sn	Bi	Cu-Ni	Zn-Ag-Cr-Pb-W	Tl-Sr-Hg-Ga-P	275
II	-	-	Hg	Bi-Pb-Zn-Sn-Ag-Cu	W-B-Ga	56
III	Cd-Hg-Mo	Zn	Sn-Cu-W	Ag-Ni-Pb-Cr	F-Tl-V-Ga	810
IV	Cd	Hg-Sn	Cu-Mo	W-Ag-Zn-Bi-Ni	Cr-Pb-P-B-Ga-Tl-F	210
V	Sn	Cd	Hg-Mo-Bi	Cu-Ag-Zn-Cr-Pb-W	Li-Tl-Ni-P-Co-Be	358
VI	Sn	Cd-Hg	Mo-Be-Cu	Zn-W-Ag-Pb-Ni-Cr-Bi	Sr-Tl-B-F-Li-Co	318
VII	Sn	Cd	Mo	Zn-Cu-Tl-Ag-Pb-Cr-Hg	W-Bi-B-Ni-Ga-P-F	220
VIII	-	Cd-Sn	Cu	Zn-Hg-Mo-Ag-Tl-Cr	W-Ni-Pb-Bi-Co-Li	186
IX	-	-	Sn	Mo-Cu-Tl-Cd-Zn	Ag-Pb-Bi-Cr-Hg-Ga	31
X	-	-	-	Sn-Cd-Tl-Cu-Zn	Ag-Hg-Mo-Pb-Cr-Ga-Bi	23
XI	-	-	-	Sn-Mo-Cu	W-Sn-Tl-Cr-Cd-Hg	19
XII	-	-	-	Mo	Zn-Pb-Co-Tl-Ni-Ag-Sn-Cu-Ga-Hg	16

Для распределения элементов в илах, развитых в русле в пределах города, характерна типичная для зон загрязнения пространственная неоднородность (рис. 3).

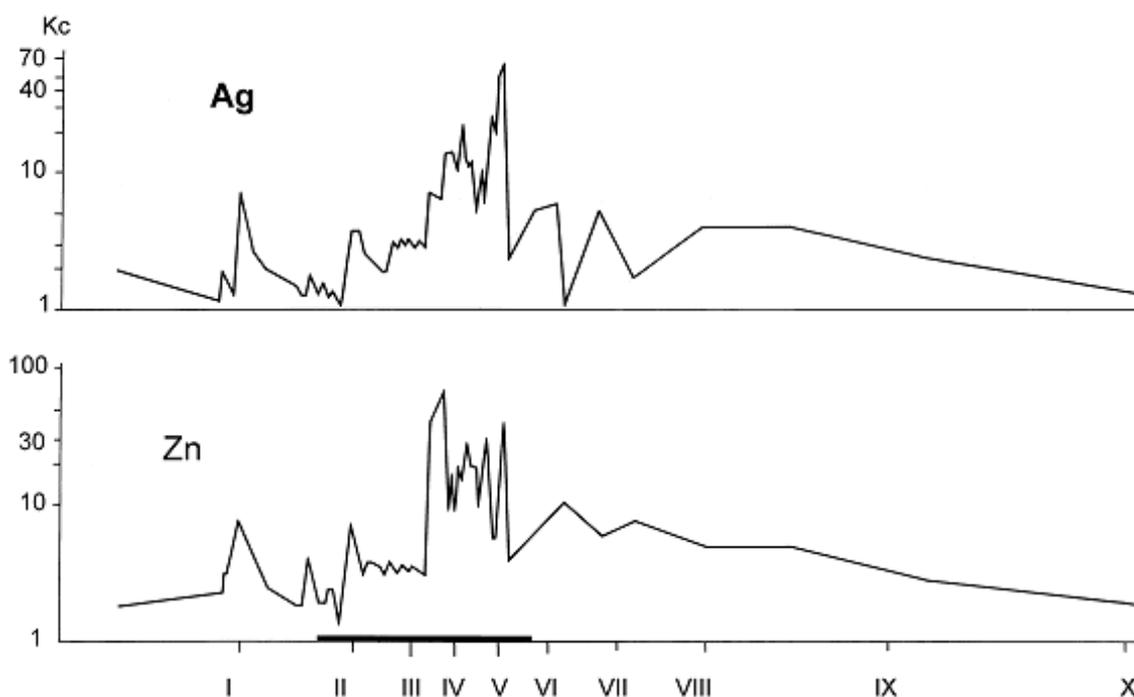


Рис. 3. Распределение Ag и Zn в донных отложениях р. Инсара в зоне влияния г. Саранска (римскими цифрами показано расположение опорных участков опробования – см. в тексте).

По мере удаления от города интенсивность концентрирования элементов в илах снижается, уменьшается вариабельность их распределения, меняются количественные соотношения между ними, что обусловлено вторичным преобразованием илов и их разубоживанием природным аллювием. Тем не менее главные элементы (Cd, Sn, Ag, Mo, Hg, Zn) сохраняют свое ведущее положение в геохимических ассоциациях, свойственных илам. С экологической точки зрения важным является тот факт, что вся толща илов характеризуется высокими концентрациями поллютантов. В свою очередь, стратифицированность илов находит отражение в неоднородности вертикального распределения элементов в их толще, проявляющейся в ступенчатом уменьшении концентраций поллютантов вниз по профилю, причем их минимальные уровни характерны для слоя, контактирующего с коренным ложем русла. Это является следствием процессов вторичного перераспределения химических элементов в толще ила и их поступлением в иловые, наддонные и подрусовые воды. Как правило, верхний слой илов обеднен литофильными элементами, что указывает на ведущую роль в его формировании «свежего» техногенного материала, характеризующегося высокими концентрациями халькофильных элементов.

В фоновом аллювии доля подвижных форм металлов невысока и составляет первые проценты от валового содержания (табл. 9). Это закономерно для подобных осадочных образований и обусловлено преимущественным вхождением металлов в состав решеток терригенных минералов. В техногенных илах относительное содержание подвижных форм металлов (за исключением Мо и Pb) заметно возрастает, а для Ni и Cd они доминируют. Показательно, что уровни содержания и баланс форм нахождения металлов в илах вблизи города схож с аналогичными параметрами их распределения в ОСВ. Это указывает на важную роль в формировании илов процессов гидравлического осаждения твердых частиц, поступающих в водоток со сточными водами. Вниз по течению в илах наблюдается снижение валовых содержаний металлов, а также концентрации их подвижных форм и относительной доли последних, как за счет ее уменьшения (для Ni, Cu), так и увеличения (Cd). Очевидно, что протекающие в толще илов процессы стремятся преобразовать техногенно обусловленный баланс форм нахождения металлов в устойчивые их соотношения, свойственные фоновым условиям. Тем не менее илы, даже в краевой части изученной зоны техногенного осадконакопления, отличаются от фоновых аллювий не только высокими уровнями металлов, но и большей долей их подвижных форм. При этом в илах концентрации подвижных форм многих металлов существенно превышают их фоновые валовые содержания. Это определяет повышенную экологическую опасность илов, поскольку содержащийся в них запас металлов, способного к трансформации, намного больше их общего пула в фоновых условиях.

Таблица 9. Распределение металлов в фоновом аллювии, ОСВ и техногенных илах *

Металл	Аллювий			ОСВ			Илы, участок III		
	А	В	С	А	В	С	А	В	С
Cr	31	0,52	1,7	1338	8,9	0,7	470	30	6,4
Ni	18	1	5,4	320	178	55,6	310	167	53,9
Cu	33	0,36	1,1	866	28,2	3,3	990	90	9,1
Zn	35	0,77	2,2	2080	866	41,6	780	240	30,8
Mo	1,6	0,03	2	72	0,4	0,6	120	2	1,7
Cd	0,13	0,0013	1	37,2	19,6	52,7	42	27	64,3
Pb	17	1,02	6	166	3,2	1,9	200	5	2,5

* А – вал, мг/кг; В – подвижные формы, мг/кг; С – доля подвижных форм, %.

Таким образом, фоновые русловые отложений с геохимической точки зрения представляет собой зрелые, относительно устойчивые образования; они характеризуют-

ся относительно высокой дифференциацией слагающего их материала. Техногенные илы – образования незрелые, продолжительность их формирования (с геологической точки зрения) невелика; они отличаются низкой дифференциации и повышенной способностью к диагенетическим изменениям слагающего их вещества, что в существенной мере и определяет дальнейшую судьбу связанных с ними поллютантов.

Заключение

Городские ландшафты характеризуются увеличением темпов и объемов поступающего в водотоки техногенного осадочного материала, что изменяет режим наносов, условия аллювиального седиментогенеза и обуславливает формирование в реках нового типа русловых отложений – техногенных илов. Гранулометрические характеристики, петрохимический состав и геохимические особенности илов свидетельствуют о том, что материальной основой их в значительной степени является техногенный осадочный материал, поступающий в реки со сточными водами города, и, в меньшей мере, в составе поверхностного стока с городской территории.

Важнейшими свойствами техногенных илов, обладающих определенной стратификацией, обусловленной условиями их накопления и вторичным преобразованием, являются темно-серый или черный цвет, химический запах, вязкотекучая или мягкопластичная консистенция, повышенная карбонатность, увеличенная агрессивность к некоторым материалам, высокие содержания алевритовых и глинистых частиц, органических веществ, глинозема, закиси железа, оксида кальция, серы, тяжелых металлов. Указанные свойства стабильны как в толще илов, мощность которых изменяется от 0,2-0,5 до 2-3,5 м, так и на значительной протяженности русла (многие десятки километров).

В ближней к источнику загрязнения зоне формирование илов обусловлено преимущественно гидравлическим осаждением взвешенных веществ; вниз по течению важную роль в осаждении осадочного материала играют также процессы коагуляции тонкой взвеси и коллоидов и трансседиментации, значимость которых возрастает при удалении от города. Определенное значение имеют химико-биогенные процессы, способствующие преобразованию техногенных веществ, их осаждению и трансформации в ходе русловой миграции, а также осаждение аморфных веществ, образующихся в результате сорбционных процессов и флокуляции. Интенсивному накоплению илов способствуют благоприятные геоморфологические условия, развитие зарослей макрофитов, невысокая скорость течения в меженные периоды, гидротехнические сооружения.

С геохимической точки зрения илы представляют собой резко неуравновешенную, неустойчивую физико-химическую систему, характеризующуюся повышенным содержанием органических веществ, минеральных новообразований и подвижных форм многих металлов, способную к активным диагенетическим изменениям слагающего их вещества. В результате вторичного переотложения речным потоком, процессов разубоживания и физико-химического преобразования илы по мере удаления от города постепенно приобретают литолого-геохимические параметры, близкие характеристикам фоновому русловому аллювию. В то же время илы, отличаясь вязкотекучей или мягкопластичной консистенцией, характеризуются повышенной устойчивостью к размыву, формируют различные формы руслового рельефа, влияют на динамику речного русла и ход руслового процесса, являются источниками вторичного загрязнения водной фазы и определяют эколого-геохимические особенности рек в зонах техногенного загрязнения.

Список литературы

1. Янин Е.П. Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек Московской области (состав, особенности, методы оценки) // Экологические системы и приборы, 2006, № 3.
2. Ефремова С.В., Стафеев К.Г. Петрохимические методы исследования горных пород. М.: Недра, 1985.
3. Рухин Л.Б. Основы литологии. Л.: Недра, 1969.
4. Янин Е.П. Русловые отложения равнинных рек. М.: ИМГРЭ, 2002.
5. Ронов А.Б., Михайловская М.С., Солодков И.И. Эволюция химического и минералогического состава песчаных пород // Химия земной коры, т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
6. Bowen H.J.M. Environmental Chemistry of the Elements. Academic Press: London etc., 1979.
7. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия, 1962, № 7.
8. Янин Е.П. Геохимические особенности осадков сточных вод промышленного города (на примере Саранска). М.: ИМГРЭ, 1996.
9. Янин Е.П. Промышленная пыль в городской среде. М.: ИМГРЭ, 2003.
10. Лазаренко А.А. Литология аллювия равнинных рек гумидной зоны. М.: Наука, 1964.