

Геоэкологическая оценка состояния малых рек крупного промышленного города по данным о содержании тяжелых металлов в донных отложениях

З. И. Слуковский*

Анализ содержания тяжелых металлов в донных отложениях водных объектов, расположенных в пределах крупных урбанизированных территорий, является важной составляющей мониторинга состояния городских экосистем. Представлены результаты исследования содержания тяжелых металлов (методом масс-спектрометрии) в русловых и пойменных речных отложениях в г. Петрозаводск (Республика Карелия). Установлено, что наибольшим уровнем загрязнения по суммарному показателю загрязнения Z_c характеризуются пойменные донные отложения р. Лососинка и русловые — р. Неглинка. Большие значения индекса геоаккумуляции I_{geo} ($>2-3$) по свинцу, цинку, кобальту, никелю и меди позволяют классифицировать донные отложения городских участков рек Петрозаводска как умеренно и сильно загрязненные.

Ключевые слова: содержание тяжелых металлов в донных отложениях рек, геоэкологическая оценка состояния малых рек, Петрозаводск.

Введение

Петрозаводск (главный город Республики Карелия) — крупный административный, промышленный, научный и культурный центр на северо-западе России. Население города составляет около 270 тыс. человек (по данным 2013 г.). Город расположен на берегу Онежского озера и вытянут вдоль Петрозаводской губы с юго-востока на северо-запад на 25 км (рис. 1) [5]. Основу промышленности города составляют электроэнергетика (62% общего объема производства), машиностроение и металлообработка (18%), пищевая (13%) и деревообрабатывающая промышленность (3%). Кроме того, Петрозаводск — важный транспортный узел, через который проходят поезда в направлении Санкт-Петербурга, Мурманска, Сортавала и Костомукши, а рядом с городом находится федеральная автомобильная трасса Санкт-Петербург — Мурманск.

Водные объекты, расположенные на урбанизированных территориях, являются наиболее уязвимыми мишенями для различных загрязняющих веществ, поступающих с водосборной площади. В г. Петрозаводск такими водными объектами служат две малые реки — Лососинка (длина 25 км, водосборная площадь — 302 км²) и Неглинка (14 км и 46 км²), протекающие в нижнем течении по центральной части города. Средний годовой расход воды в устьях рек составляет 3,7 м³/с для Лососинки и 0,51 м³/с для Неглинки, около половины годового стока приходится на весенний период (от 42 до 57% годового стока) [1].

* *Институт геологии Карельского научного центра Российской академии наук; e-mail: slukovsky87@gmail.com.*



Рис. 1. Картограмма района исследований.

Проблемой влияния урбанизированной среды на гидроэкосистемы представленных водотоков в разные годы занимались ученые Карельского научного центра РАН и Петрозаводского государственного университета. Преимущественно в этих работах акцент делался на изучение гидробионтов и физико-химических характеристик воды рек Петрозаводска [1]. Исследованию содержания и распределения тяжелых металлов как наиболее опасных загрязняющих веществ водных объектов [8] в реках Лососинка и Неглинка уделялось недостаточное внимание. Таким образом, цель данной работы — дать оценку состояния рек Петрозаводска, основываясь на данных о содержании тяжелых металлов в донных отложениях городских водотоков.

Донные отложения служат надежными индикаторами длительного загрязнения водных объектов, расположенных на техногенно нарушенных территориях, к которым, безусловно, относятся районы крупных промышленных городов [4, 14, 18]. В пресноводных объектах урбанизированных территорий, а также вблизи металлургических и химических комбинатов донные отложения почти полностью изменены под влиянием техногенеза [9]. Техногенные илы — особый тип пресноводных донных отложений (чаще всего термин используется применительно к рекам), которые отличаются от фоновых осадков увеличенным содержанием тонкодисперсных гранулометрических фракций и концентраций таких опасных токсикантов, как Cu, Ni, Pb, Cd, As, Cr, Hg и т. д. [13, 14]. Кроме того, городские водные объекты сплошь эвтрофированы, что отражается и на повышенном содержании органики в донных отложениях, легко сорбирующей металлы, поступающие в водоем (водоток) [15].

Поскольку основным фактором, влияющим на обогащение донных отложений водных объектов разного рода минеральным и органическим материалом, служит поверхностный сток с прилегающей территории, то по состоянию исследуемых осадков можно судить не только о геоэкологическом состоянии экосистемы, но и о состоянии всей водосборной площади.

Объекты и методы исследований

В ходе летних полевых работ 2011 г. по общепринятым методическим рекомендациям [3, 7] отобраны образцы проб донных отложений Лососинки и

Неглинки в черте города и в пригородной условно-фоновой зоне (рис. 1). Образцы для исследований отбирали по всей длине рек Петрозаводска с шагом 100—200 м. Исследовали верхний (0—10 см) слой речных отложений. Отобранные отложения преимущественно представлены русловой фацией, пойменные донные отложения распространены на искусственно зарегулированных участках р. Лососинка (участки Мерецкова и Фонтан). В отдельные участки исследований выделены городские части Лососинки и Неглинки и пригородные участки обоих водотоков, осадки которых представлены русловой фацией. Всего было исследовано 117 образцов проб речных отложений Петрозаводска. Просушивание образцов проводилось до воздушно-сухого состояния. Достижение максимальной сохранности глинистой фракции достигалось тем, что жидкая часть пробы просушивалась отдельно — в стеклянных чашках Петри, промытых предварительно дистиллированной водой. Просеивание проб производили с использованием стандартного сита с размером ячеек 0,1 мм. Химический состав глинисто-алевритовой фракции речных отложений — надежный индикатор загрязненности гидроэкосистем, поскольку обусловлен процессами антропогенного характера на техногенно нарушенных территориях [11, 17].

Определение содержания $Fe_{\text{общ}}$ в пробах донных отложений было осуществлено при помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра марки ARL ADVANT'X. Определение потерь при прокаливании (п. п. п.) проводили весовым способом после нагревания исследуемых проб до температуры 1100°C. Содержание Pb, Sb, Cu, Zn, Co, Mo, Ni в пробах рек Лососинка и Неглинка определяли масс-спектральным методом на приборе X Series-2 ICP-MS. Для проверки корректности анализа образца использовали стандартный образец химического состава донного ила оз. Байкал БИЛ-1 (ГСО 7126-94).

Статистическая обработка выполнена при помощи программы Microsoft Excel 2007. Для графической иллюстрации результатов использованы программы EasyCapture 1.2.0 и Inkscape 0.48.4. Для оценки уровня загрязнения донных отложений тяжелыми металлами использовали суммарный показатель загрязнения Z_c и индекс геоаккумуляции I_{geo} [2, 16]. Для расчета значений суммарного показателя загрязнения учитывали содержание того или иного металла в отдельно взятой точке исследования, если коэффициент концентрации (K_c) химического элемента оказывался >1 . Коэффициент концентрации рассчитывали как отношение концентрации химического элемента в пробе донных отложений из городской среды к медианному содержанию соответствующего металла в осадках условно-фоновой территории.

Результаты и их обсуждение

Из всех городских участков рек Петрозаводска наименьшие медианные значения концентрации тяжелых металлов (табл. 1) отмечены в русловых донных отложениях р. Лососинка (районы Голиковка и парк рядом с бывшим Онежским тракторным заводом). По содержанию Pb, Ni, Sb, Mo и W эти городские отложения близки к условно-фоновым, относящимся к пригородной зоне обеих изучаемых рек. Медианные содержания этих элементов в донных отложениях пригородных участков водотоков и городских русловых осадков Лососинки близки к средним концентрациям представленных металлов в почвенном покрове горизонтов O и E территории Карелии [12].

Таблица 1

Содержание тяжелых металлов (мг/кг) в донных отложениях рек г. Петрозаводск

Показатель	Pb	Zn	Co	Ni	Cu	Sb	Mo	W
р. Неглинка (городская часть), $N = 40$								
Me	31,0	159,3	17,8	29,8	74,0	1,2	1,1	3,7
x_{\max}	101,4	296,1	28,1	43,2	178,2	3,8	5,3	20,8
x_{\min}	18,1	70,8	11,5	22,0	34,2	0,3	0,6	1,0
S_{Me}	10,0	63,2	4,3	4,8	28,2	0,5	0,3	1,8
р. Лососинка (участок Фонтан), $N = 20$								
Me	37,9	160,3	16,9	27,8	54,5	1,4	1,0	2,5
x_{\max}	79,4	261,2	24,1	40,6	119,5	3,3	1,5	5,9
x_{\min}	20,1	66,2	11,2	17,3	21,9	0,4	0,5	0,9
S_{Me}	11,9	65,3	3,5	4,1	24,5	0,5	0,3	1,3
р. Лососинка (участок Мерецкова), $N = 18$								
Me	18,3	117,3	19,0	27,0	31,5	0,4	0,8	1,1
x_{\max}	30,3	354,4	24,0	36,6	81,1	1,8	1,2	4,9
x_{\min}	14,2	60,3	9,7	17,9	19,1	0,2	0,4	0,3
S_{Me}	3,4	51,2	6,2	7,1	16,8	0,3	0,2	0,6
р. Лососинка (городская часть, русловая фация), $N = 17$								
Me	14,8	67,7	10,5	16,9	19,6	0,3	0,3	0,3
x_{\max}	50,5	172,8	15,7	30,8	80,1	1,9	0,8	2,4
x_{\min}	10,6	43,2	7,5	13,3	12,4	0,1	0,0	0,1
S_{Me}	2,9	17,4	2,5	3,3	4,8	0,2	0,2	0,3
Пригородная условно-фоновая территория (обе реки), $N = 18$								
Me	13,1	37,3	7,5	16,4	12,5	0,1	0,4	0,3
x_{\max}	28,1	63,7	10,6	20,7	28,2	1,6	0,8	0,6
x_{\min}	11,1	19,2	3,7	10,1	6,3	0,1	0,2	0,2
S_{Me}	1,1	15,6	3,7	3,4	5,8	0,1	0,1	0,1

Примечание. Me — медиана, x_{\max} и x_{\min} — максимальное и минимальное значения выборки; S_{Me} — стандартное отклонение медианы; N — число вариантов в выборке.

Интересно, что донные отложения р. Неглинка, которые преимущественно представлены русловой фацией, наиболее обогащены такими металлами, как Zn, Ni, Cu, Sb, Mo и W. Большие медианные значения концентраций Pb, Zn, Co, Sb и Mo отмечены в осадках зарегулированных участков р. Лососинка (Pb, Zn, Sb, Mo — участок Фонтан, Co — участок Мерецкова). Важно отметить и экстремальные значения концентраций некоторых тяжелых металлов, которые в несколько раз превышают медианные содержания элементов в исследованных выборках. Так, максимальное содержание Pb для обоих водотоков (101,4 мг/кг) отмечено в пробе донных отложений р. Неглинка, отобранной в центре города. Аномальные концентрации Pb (79,4 мг/кг), а также Cu (119,5 мг/кг) и Zn (261,2 мг/кг) отмечены в пробе зарегулированного участка р. Лососинка Фонтан в районе границы перехода водотока из основного гидрологического режима в водохранилище [10]. Аномальное значение Zn (354,4 мг/кг), наибольшее для обеих рек Петрозаводска, отмечено в пробе, отобранной в пойменной зоне

Лососинки на участке Мерецкова. В донных отложениях Неглинки, в свою очередь, отмечены экстремальные концентрации Mo ($5,3 \text{ мг/кг}$) в районе условной границы пригородной и городской частей водотока, а также W ($20,8 \text{ мг/кг}$) и Cu ($178,2 \text{ мг/кг}$) — в пробе, отобранной в районе автомобильного моста (центральная часть города).

По данным сравнения выборок содержания тяжелых металлов по критерию Манна — Уитни, единый уровень концентраций Co и Ni отмечен для русловых донных отложений городской части Неглинки и обоих зарегулированных участков Лососинки. Единый уровень содержания Pb , Zn , Sb и Mo отмечен только для Неглинки и участка Лососинки Фонтан. Оба исследуемых зарегулированных участка Лососинки характеризуются единым уровнем накопления Co и Ni , по остальным металлам установлено статистически значимое различие между двумя выборками данных ($U_{\text{эмп}} < U_{\text{кр}}$). Самое большое различие по уровню накопления в донных отложениях между всеми исследуемыми городскими участками рек Петрозаводска отмечено для Cu и W , которые наиболее интенсивно накапливаются в русловых отложениях Неглинки.

Установлено, что уровень загрязнения донных отложений и, как следствие, всей реки увеличивается вниз по течению для обоих водотоков, т. е. ближе к устьям рек и соответственно — к Петрозаводской губе Онежского озера, что отражается на повышении уровня загрязнения этого крупного водного объекта. Наибольшие значения Z_c установлены для части р. Неглинка, протекающей по центру города, где водоток пересекает улицы, характеризующиеся значительным транспортным потоком. В последнем районе (под автомобильным мостом) отмечено наибольшее значение Z_c (129), которое характеризует данный участок Неглинки как район с очень высоким уровнем техногенного загрязнения. Большинство мест обследования донных отложений Неглинки характеризуется высоким и средним уровнями загрязнения городской реки (рис. 2). Примерно такие же соотношения установлены для донных отложений зарегулированного участка р. Лососинка Фонтан.

Согласно рассчитанным значениям критерия Манна — Уитни (табл. 2), донные отложения участка Фонтан р. Лососинка и русловые осадки городской части р. Неглинка характеризуются единым уровнем загрязнения ($U_{\text{эмп}} > U_{\text{кр}}$ при $p < 0,01$).

Значения Z_c донных отложений другого зарегулированного участка Лососинки, Мерецкова, варьируются в пределах от 4 до 49 (медиана — 13). Большинство исследованных образцов проб характеризуется средним и низким уровнями загрязнения. Русловые донные отложения городской части Лососинки, отобранные в районах лесопарковых зон города, характеризуются преимущественно низким уровнем техногенного загрязнения ($Z_c < 10$). Только в районе, где река протекает под автомобильным мостом, установлен высокий уровень загрязнения исследуемого водотока. Медианное значение суммарного показателя загрязнения донных отложений Лососинки в указанных районах равно 4 (разброс значений от 1 до 34). По данным теста Манна — Уитни выборки значений Z_c всех исследуемых городских участков Лососинки статистически значимо различаются при 99%-ном уровне надежности (табл. 2). Данный факт свидетельствует о том, что пойменные донные отложения реки являются наиболее “легкими мишенями” для тяжелых металлов, попадающих в водоток, из-за наличия в них большего содержания тонкодисперсных фракций осадков

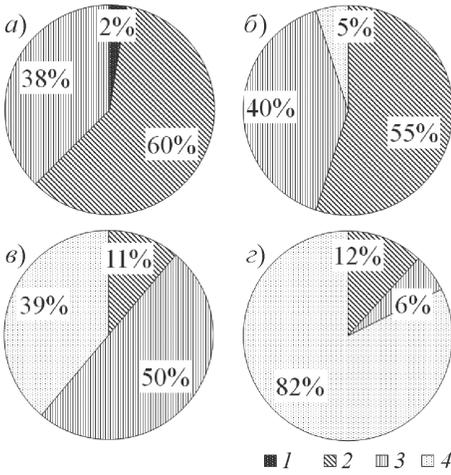


Рис. 2. Доля проб с различным уровнем загрязнения донных отложений разных городских участков рек г. Петрозаводск. Исследуемые участки рек: а — Неглинка, город; б — Лососинка, участок Фонтан; в — Лососинка, участок Мерещкова; г — Лососинка, город (русло). Уровни техногенного загрязнения: 1 — очень высокий, 2 — высокий, 3 — средний, 4 — низкий.

по сравнению с русловыми отложениями. Кроме того, большое значение в накоплении исследуемых загрязняющих веществ имеет фактор близости к реке больших автомобильных дорог и густота сети ливневых канализационных стоков, поставляющих в экосистему реки значительное число загрязняющих веществ с водосборной территории.

Необходимо отметить, что уровень загрязнения по Z_c русловых донных отложений городской части Неглинки также статистически значимо различается (т. е. он больше) с уровнями загрязнения русловых осадков городской части Лососинки и отложений зарегулированного участка реки Мерещкова ($U_{эмп} \ll U_{кр}$ при $p < 0,01$). Данное обстоятельство позволяет говорить о большей загрязненности Неглинки по сравнению с указанными районами исследования Лососинки (кроме участка Фонтан). Вероятно, это связано с большей гумифицированностью Неглинки по сравнению с Лососинкой [6], поскольку органическое вещество в донных отложениях наряду с соединениями железа служит одним из основных носителей тяжелых металлов, поступающих в водный объект с поверхностным стоком. В донных отложениях рек Петрозаводска все исследованные тяжелые металлы имеют тесную статистически значимую положительную корреляционную связь как с $Fe_{общ}$, так и с показателем потерь при прокаливании, являющимся количественным индикатором валового содержания в донных отложениях органики [4] (рис. 3). Донные отложения приустьевого участка Лососинки Фонтан служат при этом своеобразным барьером для поступления

Таблица 2

Оценка различий между выборками значений Z_c для разных городских участков рек г. Петрозаводск

Река, участок исследования	р. Лососинка		
	Фонтан	Мерещкова	город (русло)
р. Неглинка, город	314 (251*, 294**)	93,5 (221*, 261**)	36 (206*, 245**)
р. Лососинка, Фонтан		64,5 (100*, 123**)	24 (93*, 115**)
р. Лососинка, Мерещкова	64,5 (100*, 123**)		65 (82*, 102**)

Примечание. В таблице указаны расчетные значения $U_{эмп}$, в скобках — критические значения $U_{крит}$ (* — при $p < 0,05$; ** — $p < 0,01$).

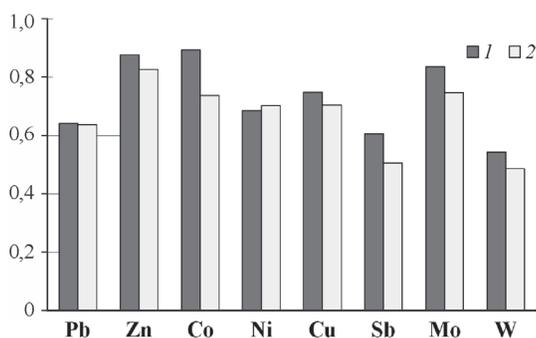


Рис. 3. Значения коэффициентов корреляции тяжелых металлов в донных отложениях рек г. Петрозаводск с железом (1) и показателем потерь при прокаливании (2).

Таблица 3

Медианные значения индекса геоаккумуляции I_{geo} для донных отложений городских участков рек г. Петрозаводск

Элемент	р. Неглинка, город	р. Лососинка		
		Фонтан	Мерецкова	город (русло)
Pb	2,74	2,82	2,51	2,41
Zn	3,90	3,90	3,77	3,53
Co	2,25	2,23	2,88	2,02
Ni	3,09	2,78	2,77	2,57
Cu	2,96	2,96	2,72	2,51
Sb	-0,67	-0,61	-1,10	-1,28
Mo	-0,21	-0,22	-0,33	-0,70
W	0,15	-0,02	-0,40	-0,91

загрязняющих веществ ниже по течению, т. е. в Петрозаводскую губу Онежского озера. Хотя очевидно, что часть тяжелых металлов мигрирует в озеро и аккумулируется в поверхностном слое его донных отложений.

Наибольшими значениями индекса I_{geo} характеризуются донные отложения всех изучаемых городских участков рек Петрозаводска по Pb, Zn, Co, Ni и Cu (табл. 3). При этом загрязнение речных осадков Zn (все изучаемые участки водотоков) и Ni (только р. Неглинка) оценивается как сильное ($I_{geo} > 3$). Остальные значения, приведенные в таблице, позволяют говорить об умеренно сильном загрязнении петрозаводских рек Лососинка и Неглинка. Индексы геоаккумуляции по Sb, Mo и W соответствуют уровню слабого загрязнения этими элементами речных осадков Петрозаводска ($I_{geo} < 0$). Таким образом, приоритетными загрязняющими веществами экосистем малых рек Лососинка и Неглинка необходимо считать элементы 1-го и 2-го классов опасности — Pb, Zn, Co, Ni и Cu.

Заключение

Проведенные исследования содержания тяжелых металлов в русловых и пойменных донных отложениях рек г. Петрозаводск, крупного промышленного и транспортного узла на северо-западе России, позволили установить, что наиболее загрязненными по содержанию отдельных металлов в речных отложениях являются пойменные городские участки р. Лососинка (Фонтан и Мерецкова) и городская часть р. Неглинка, осадки которой представлены преимущественно русловой фацией. Единым уровнем накопления в донных отложениях Co и Ni характеризуются городская часть Неглинки и оба зарегулированных участка

Лососинки. При этом единый уровень концентрации Pb, Zn, Sb и Mo отмечен только для Неглинки и участка Лососинки Фонтан.

Максимальные значения суммарного показателя загрязнения донных отложений Z_c отмечены для русловых осадков Неглинки, протекающей в центральной части Петрозаводска, и в пойменных отложениях Лососинки приустьевого участка Фонтан. Данные участки следует отнести к наиболее загрязненным на всей городской территории, особенно в ее центральной части, являющейся водосборной площадью для исследованных водотоков в их нижнем течении (перед впадением в Онежское озеро). Высокие значения индекса геоаккумуляции I_{geo} по Pb, Zn, Co, Ni и Cu позволяют классифицировать донные отложения городских участков рек Петрозаводска как умеренно и сильно загрязненные. Обозначенные тяжелые металлы следует считать приоритетными загрязняющими веществами экосистем обеих рек и их водосборных бассейнов.

Литература

- 1. Водные объекты города Петрозаводска:** Учебное пособие. /Ред. А. В. Литвиненко, Т. И. Регрант. — Петрозаводск, Карельский научный центр РАН, 2013, 109 с.
- 2. Геохимия окружающей среды.** — М., Недра, 1990, 335 с.
- 3. ГОСТ 17.1.5.01-80.** Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность.
- 4. Даувальтер В. А.** Геоэкология донных отложений озера. — Мурманск, Изд-во МГТУ, 2012, 242 с.
- 5. Карелия:** энциклопедия. В 3 т. /Гл. ред. А. Ф. Титов. Т. 2.: К–П. — Петрозаводск, ИД ПетроПресс, 2009, 464 с.
- 6. Комулайнен С. Ф., Морозов А. К.** Изменение структуры фитоперифитона в малых реках урбанизированных территорий. — Водные ресурсы, 2007, т. 34, № 3, с. 356—363.
- 7. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения поверхностных водотоков химическими элементами.** /Под ред. Ю. Е. Сагт, Л. Н. Алексинской, Е. П. Янина. — М., ИМГРЭ, 1982, 74 с.
- 8. Мур Дж. В., Рамамурти С.** Тяжелые металлы в природных водах: Контроль и оценка влияния. /Пер. с англ. — М., Мир, 1987, 288 с.
- 9. Перельман А. И.** Геохимия. — М., Высшая школа, 1989, 528 с.
- 10. Рыбаков Д. С., Слукровский З. И.** Геохимические особенности загрязнения донных осадков зарегулированной городской реки. — Ученые записки Петрозаводского государственного ун-та, 2012, № 4, с. 67—73.
- 11. Слукровский З. И., Бубнова Т. П.** Химический состав фракции < 0,1 мм отложений реки Неглинки — индикатор загрязнения городского водотока. — Ученые записки Петрозаводского государственного ун-та, 2013, № 4, с. 50—56.
- 12. Федорев Н. Г., Бахмет О. Н., Солодовников А. Н., Морозов А. К.** Почвы Карелии: геохимический атлас. — М., Наука, 2008, 47 с.
- 13. Янин Е. П.** Особенности гранулометрического состава русловых отложений малой реки в зоне влияния промышленного города. — Известия высших учебных заведений. Геология и разведка, 2009, № 3, с. 69—74.
- 14. Янин Е. П.** Техногенные речные илы (вещественный состав, геохимические особенности, экологическая оценка). — Экологическая экспертиза, 2013, № 1, с. 2—195.
- 15. Förstner U.** Sediment-associated contaminants — an overview of scientific bases for developing remedial options. — Hydrobiologia, 1987, vol. 149, pp. 221—246.
- 16. Müller G.** Schwermetalle in den Sedinenten des Rheins. — Veränderungen seit 1971. — Umschau in Wissenschaft and Technik, 1979, vol. 79, pp. 778—783.
- 17. Skorbilowicz E. and Skorbilowicz M.** Metals in grain fractions of bottom sediments from selected rivers in north-eastern Poland. — Physics and Chemistry of the Earth, 2011, No. 36, pp. 567—578.
- 18. Songa Y., Ji J., Yang Z., et al.** Geochemical behavior assessment and apportionment of heavy metal contaminants in the bottom sediments of lower reach of Changjiang River. — Catena, 2011, No. 85, pp. 73—81.