

УДК 556.06:551.482.212

## СВЯЗИ МЕЖДУ МИКРОЭЛЕМЕНТНЫМ СОСТАВОМ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И ПРОЦЕССАМИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В ДЕЛЬТЕ РЕКИ МЕКОНГ (ВЬЕТНАМ)

**Фунг Тхай Зьонг,**

аспирант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: phungthaiduongdhdtd@gmail.com

**Савичев Олег Геннадьевич,**

д-р географ. наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: OSavichev@mail.ru

**Актуальность работы.** Исследование механизмов формирования природных и природно-антропогенных геохимических аномалий в водных объектах играет исключительно важную роль в геологии и геоэкологии, является необходимым этапом разработки долгосрочных прогнозов состояния водных и наземных экосистем и планирования природоохранных мероприятий. На примере Меконга – крупнейшей реки Индокитая – рассмотрен один из ключевых аспектов этой проблемы – выявление связей между геохимическими и гидрологическими процессами в дельте большой реки. Выбор объекта обусловлен значением реки в социально-экономическом развитии юго-восточной Азии.

**Цель работы:** выявление связей между процессами формирования донных отложений в дельте реки Меконг (Вьетнам) и их микроэлементного состава.

**Методы исследования:** ландшафтно-геохимический и географо-гидрологический методы, математическое моделирование гидрологических процессов.

**Результаты и выводы.** Получены данные о микроэлементном составе донных отложений в дельте реки Меконг. Выполнена оценка деформаций русла реки Меконг (рукав Хамлуонг) с использованием метода А.В. Караушева по данным промерных работ в 1999 и 2000 гг. в створах, расположенных в 72, 49, 14, 1 км от морского края дельты. Установлено, что аккумуляция наносов преобладает на участке рукава Хамлуонг, 0–31 км от морского края дельты. На основе данных геохимического опробования, проведенного Фунг Тхай Зьонгом в 2013–2014 гг., показано, что, во-первых, в пределах этого участка ежегодно оседает, т/год: Zn – 1244; Cu – 443; Pb – 63; Cd – 18; As – 96; Hg – 1,7. Во-вторых, в дельте Меконга основная часть массы Zn, Cu, Pb, Cd, 73 % массы As и 69 % массы Hg формируется за счёт осаждения частиц наносов, с которыми (во взвешенной форме) переносятся указанные микроэлементы. 27 % массы As и 31 % массы Hg связано с сорбцией на осаждающихся частицах и выведением из раствора малорастворимых соединений. Сделан вывод о том, что для сельскохозяйственного использования наиболее оптимально применение донных отложений, изъятых в дельте Меконга на участке от 31 до 15 км. Донные отложения на участке 0–15 км с наиболее высокими концентрациями токсичных микроэлементов целесообразно использовать для строительных нужд при инженерной защите прибрежных территорий.

**Ключевые слова:**

Дельта Меконга, Вьетнам, донные отложения, микроэлементный состав, русловые деформации.

### Введение

Река Меконг – одна из крупнейших рек мира и главная водная артерия Индокитая. Состояние Меконга в значительной степени определяет социально-экономическую ситуацию в этом регионе, что обуславливает актуальность исследований процессов его формирования, в том числе процессов формирования донных отложений и их химического состава. Особенно важное значение такие исследования приобретают в дельте Меконга, где коммунальное и сельское хозяйство в существенной мере зависит от того, где, как, в каком количестве и с каким составом происходит формирование или размыв донных отложений.

Указанные вопросы рассматриваются в рамках функционирования системы управления водными ресурсами Социалистической республики Вьетнам [1–6] и международной комиссии по реке Меконг [7–11], а также в работах ряда исследователей

[12–15]. Благодаря этому в настоящее время имеется выстроенная система режимных гидрологических наблюдений, выполнено обоснование ряда крупных водохозяйственных проектов. Тем не менее, непосредственно в дельте рассматриваемой реки геохимическую изученность донных отложений по состоянию на 2011–2014 гг. пока нельзя признать удовлетворительной, что определило общее направление исследования, выполненного авторами в Томском политехническом университете (ТПУ) и университете Донгтхап (г. Цаолянь, Социалистическая республика Вьетнам) в 2012–2014 гг.

В данной работе рассмотрены результаты одного из этапов этого исследования, направленного на выявление связей процессов формирования донных отложений в дельте Меконга и их микроэлементного состава, информация о которых является основой для: 1) принятия управленческих решений в области использования и охраны рассматриваемой

мого водного объекта; 2) разработки теории формирования природных и природно-антропогенных геохимических аномалий в водных объектах.

#### Объект и методика исследования

Район исследований схематично показан на рис. 1. Дельта Меконга площадью 46700 км<sup>2</sup> [12] имеет сложное строение и представлена двумя комплексами рукавов – Тиензанг и Хаузанг. Комплекс Хаузанг включает три крупных рукава, а Тиензанг – шесть, среди которых наибольший по водности – рукав Хамлуонг. В качестве основного объекта исследования выбран крупный рукав Хамлуонг, по которому, согласно [5], проходит примерно 16 % общего стока Меконга.

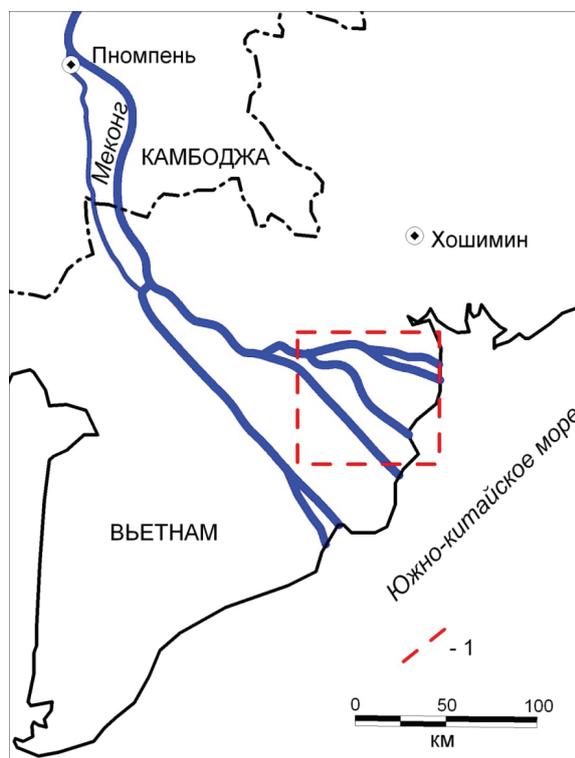


Рис. 1. Схема расположения района исследований (1) в дельте реки Меконг

Fig. 1. Plan of the research area (1) in the delta of the Mekong river

Методика исследований включала в себя: 1) полевые работы по отбору проб донных отложений и воды в рукавах Хамлуонг, Кочьен, Кыадай и проток; 2) лабораторные работы по определению химического состава проб донных отложений и воды; 3) гидравлические расчёты процессов осаднения/размыва донных отложений. Задача первых двух этапов – получение общей характеристики химического состава донных отложений и поверхностных вод, задача третьего этапа – оценка общего направления процессов формирования донных отложений.

Отбор проб выполнен в январе 2013 и 2014 гг. Фунг Тхай Зыонгом и сотрудниками университета

Донгтхап (г. Цаолань, Социалистическая республика Вьетнам), в том числе: 1) в январе 2013 г. было отобрано по 12 проб донных отложений и воды в рукаве Хамлуонг на участке 0–75 км от морского края дельты, по 2 пробы из рукавов Кыадай и Кочьен (в верхней и нижней части), 4 пробы из протока; 2) в январе 2014 г. – по 3 пробы донных отложений и воды из рукава Хамлуонг в верхней, средней и нижней частях. Отбор донных отложений проводился из верхнего слоя около 0,2 м в 10–50 м от берега в рукавах и в 5–10 м от берега в протоках, отбор проб вод – из слоя 0,3–0,4 м от поверхности. Пробы донных отложений высушивались при температуре 25 °С и измельчались до фракции с диаметром частиц до 0,5 мм, пробы воды фильтровались с помощью бумажного фильтра с диаметром пор 1,5 мкм.

Лабораторные работы в 2013 г. выполнялись в лаборатории университета Донгтхап, в 2014 г. – в университете Донгтхап и гидрохимической лаборатории ТПУ (номер государственной аккредитации № РОСС RU. 0001.511901 от 12.07.2011 г.). В донных отложениях проводилось определение: в водной вытяжке – значений удельной электропроводности (УЭП, кондуктометрия) и pH (потенциометрия), концентраций NH<sub>4</sub><sup>+</sup> и NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (ионная хроматография); в кислотной вытяжке – концентраций Zn, Cu, Pb, Cd, As, Hg (атомно-абсорбционный метод). Аналогичными методами определялись соответствующие показатели поверхностных вод. Кроме того, в 2014 г. выполнено определение в поверхностных водах и водной вытяжке из проб донных отложений SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (турбидиметрический метод), Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, бихроматной (БО) и перманганатной (ПО) окисляемости (титриметрический метод), Si (фотометрический метод), в кислотной вытяжке из донных отложений – Hg, As, Zn, Pb, Cu, Cd, Mn, Al, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> (атомно-абсорбционный, инверсионно-вольтамперометрический, пламенно-эмиссионная спектрометрия).

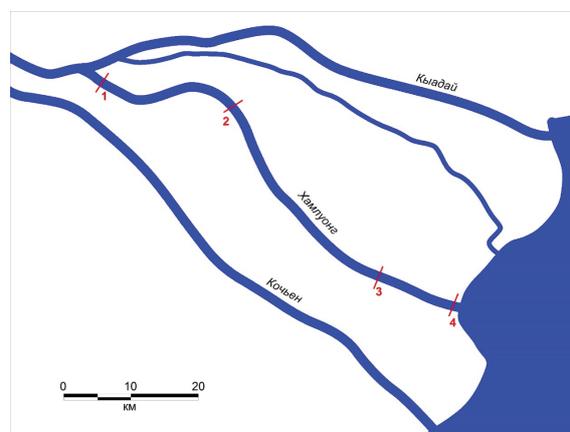


Рис. 2. Схема расположения расчётных створов на рукаве Хамлуонг

Fig. 2. Plan of control points location on the Hamluong channel

В качестве исходной информации принято: а) расходы воды, м<sup>3</sup>/с: в среднем за год – 1890, в январе – 1168, в феврале – 681, в марте – 465, в апреле – 360, в мае – 478, в июне – 1330, в июле – 2104, в августе – 3137, в сентябре – 3918, в октябре – 3978, в ноябре – 3075, в декабре – 1986 [2]; б) уклон водной поверхности 0,008 м/км [3]; в) профили поперечного сечения рукава Хамлуонг (рис. 2) в сечении № 1 и 2 в 2000 г., а в сечении № 3, 4 в 1999 и 2000 гг. [4]; в) средний диаметр взвешенных наносов принят в размере 0,006 мм [5].

#### Результаты исследования и их обсуждение

Анализ собственных материалов и данных, полученных другими авторами [1, 4, 5], позволил получить обобщённую характеристику химического состава поверхностных вод и донных отложений в дельте Меконга на участке 4–77 км от её морского края за период с 2010 по 2014 гг. (табл. 1, 2). В верхнем звене этого участка поверхностные воды в целом пресные, гидрокарбонатные кальциевые, вблизи моря (до 10 км) солоноватые, хлорид-

ные кальциевые. На всём протяжении участка воды обычно нейтральные и слабощелочные, содержат значительное количество нитратов и ионов аммония, соответствующее, согласно [7], категориям «очень плохие» («very bad») и «плохие» («bad»). Превышение российских нормативов качества воды наблюдается также по содержанию Hg, Cu, Zn, Mn, Al, Fe, Si, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, органических веществ по биохимическому потреблению кислорода (БПК<sub>5</sub>) за 5 суток, превышение нормативов, установленных в республике Вьетнам [16], по содержанию соединений азота (табл. 1).

Для донных отложений нормативы качества установлены во Вьетнаме [17], но отсутствуют в Российской Федерации. С учётом того, что почвенный покров в дельте Меконга формируется под влиянием процессов осаждения речных наносов, нельзя не отметить повышенные концентрации Cu и Cd (табл. 1). Общая закономерность в распределении концентраций тяжёлых металлов в донных отложениях заключается в определённом их увеличении по мере приближения к морскому краю дельты (рис. 3).

**Таблица 1.** Средний химический состав поверхностных вод в дельте р. Меконг (4–77 км от морского края дельты)

**Table 1.** Average chemical composition of the surface waters in the delta of the Mekong river (4–77 km from the delta sea edge)

Показатель Index	Рукава и протоки Channels		Рукав Хамлуонг Hamluong channel		Протоки Channels		Норматив качества воды во Вьетнаме [16] Water quality standard in Vietnam [16]
	A	δ <sub>A</sub>	A	δ <sub>A</sub>	A	δ <sub>A</sub>	
pH, ед. pH	7,55	0,11	7,58	0,11	7,47	0,32	6,5–8,5
мг/дм <sup>3</sup> (от Ca <sup>2+</sup> до Hg) /mg/dm <sup>3</sup> (from Ca <sup>2+</sup> to Hg)							
Ca <sup>2+</sup>	34,3	5,0	22,4	5,5	43,5	7,3	–
Mg <sup>2+</sup>	29,2	6,0	22,1	15,0	37,2	6,8	–
Na <sup>+</sup>	89,3	73,8	154,3	139,6	19,6	2,2	–
K <sup>+</sup>	6,3	4,3	9,6	8,2	2,8	0,5	–
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	63,9	59,1	63,9	59,1	–	–	–
Cl <sup>-</sup>	103,2	66,5	166,3	110,8	–	–	–
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	154,7	42,6	91,0	46,7	131,5	27,6	–
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	25,940	2,837	27,815	3,916	19,423	3,775	5,0
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,029	0,007	0,020	0,008	–	–	0,02
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	4,591	0,675	4,675	0,979	4,763	1,660	1,0
PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0,049	0,005	0,047	0,010	–	–	–
Si	4,658	0,429	5,224	0,792	–	–	–
Fe	1,549	0,161	1,736	0,273	–	–	–
Al	0,120	0,039	0,217	0,081	–	–	–
Mn	0,022	0,007	0,022	0,007	–	–	–
Zn	0,3530	0,0128	0,3433	0,0166	0,4014	0,0220	1,0
Cu	0,0605	0,0051	0,0564	0,0074	0,0736	0,0073	0,2
Pb	0,0005	0,0003	0,0007	0,0004	<0,0001	<0,0001	0,02
Cd	0,0002	<0,0001	0,0002	<0,0001	0,0002	<0,0001	0,005
As	0,0004	<0,0001	0,0004	<0,0001	0,0004	<0,0001	0,02
Hg	0,0001	<0,0001	0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,001
ХПК, мгО/дм <sup>3</sup> COD, mgO/dm <sup>3</sup>	7,003	1,748	8,185	3,464	–	–	–
БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup> BOD, mgO/dm <sup>3</sup>	2,302	0,127	2,165	0,119	–	–	–

Примечание: A – среднее арифметическое; δ<sub>A</sub> – погрешность определения среднего арифметического; приведены результаты обобщения материалов [1, 4, 6] и данных, полученных авторами в 2011–2014 гг.

Note: A is the arithmetic mean; δ<sub>A</sub> is the error of determining the arithmetic mean. The table introduces the results of generalizing materials of [1, 4, 6] and data obtained by the authors in 2011–2014.

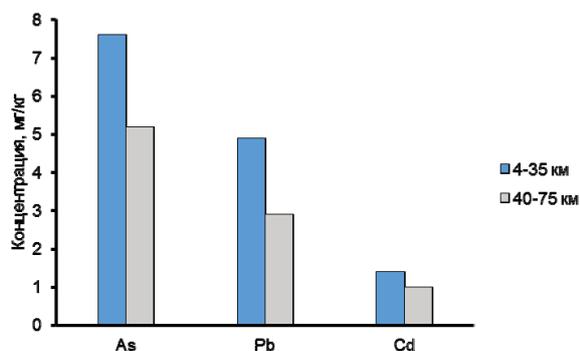
**Таблица 2.** Средний химический состав донных отложений и водных вытяжек из донных отложений в дельте р. Меконг (4–77 км от морского края дельты)

**Table 2.** Average chemical composition of the bed load sediments in the delta of the Mekong river (4–77 km from the delta sea edge)

Показатель Index	Рукава и протоки Channels		Рукав Хамлуонг Hamluong channel		Протоки Channels		Норматив качества донных отложений во Вьетнаме [17] Water quality standard of bed load sediments in Vietnam [17]
	A	$\delta_A$	A	$\delta_A$	A	$\delta_A$	
pH*, ед. pH	7,29	0,11	7,42	0,10	6,79	0,21	–
мг/кг (от Ca <sup>2+</sup> до Hg)/mg/dm <sup>3</sup> (from Ca <sup>2+</sup> to Hg)							
Ca <sup>2+</sup> *	–	–	102,3	12,4	–	–	–
Mg <sup>2+</sup> *	–	–	96,0	41,2	–	–	–
Na <sup>+</sup> *	–	–	761,8	675,9	–	–	–
K <sup>+</sup> *	–	–	58,0	35,7	–	–	–
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> *	–	–	207,3	42,8	–	–	–
Cl <sup>-</sup> *	–	–	1024,6	980,2	–	–	–
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> *	–	–	584,8	193,7	–	–	–
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> *	31,611	1,986	31,832	2,802	28,386	1,932	–
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> *	47,268	2,694	48,809	4,174	37,606	2,896	–
Si*	–	–	118,667	9,945	–	–	–
Fe	–	–	32403,3	1872,5	–	–	–
Al	–	–	38393,3	6226,6	–	–	–
Mn	–	–	713,933	30,346	–	–	–
Zn	94,797	2,406	92,547	3,386	98,985	3,110	124
Cu	31,306	1,234	30,404	1,836	33,888	0,571	18,7
Pb	6,228	1,415	7,668	2,067	3,461	1,006	30,2
Cd	0,969	0,147	0,966	0,202	0,785	0,195	0,7
As	5,153	0,506	5,170	0,742	4,625	0,556	7,24
Hg	0,100	0,006	0,107	0,008	0,072	0,010	0,13
ПО*, мгО/дм <sup>3</sup> Permanganate oxidation, mgO/dm <sup>3</sup>	–	–	19,667	5,397	–	–	–

Примечание: \* – результаты анализа водной вытяжки.

Note: \* – the results of water extract analysis.



**Рис. 3.** Средние концентрации As, Pb и Cd в донных отложениях рукава Хамлуонг на участках 4–35 и 40–75 км в январе 2013 г. (на каждом участке по 6 проб)

**Fig. 3.** Average concentrations of As, Pb and Cd in bed load sediments of the Hamluong channel on the sites of 4–35 and 40–75 km in 2013 January (6 samples on each site)

Можно предположить, что это снижение так или иначе связано с русловыми процессами и твёрдым стоком. Однако методология подобных исследований в настоящее время не разработана. По этой причине и с учётом имеющихся гидрологических и геохимических данных предложены и апробированы следующие алгоритмы: 1) выявления

связей между процессами формирования донных отложений и их составом; 2) оценки аккумуляции микроэлементов в донных отложениях.

1. Прежде всего, необходимо определить масштабы аккумуляции или размыва донных отложений. Для решения этой задачи нами использован метод А.В. Караушева [18], основанный на использовании упрощённого одномерного уравнения транспорта наносов в размываемом русле при условии незначительности изменения расхода влекомых наносов по длине реки в среднем для всего сечения потока:

$$\Delta h_b = \frac{G_s \Delta t}{1 - \lambda}, \quad (1)$$

$$G_s = (u + k)S - kS_{ss}, \quad (2)$$

$$S_{ss} = 150 N_Y \eta^2 \frac{v_a^2}{h_a}, \quad (3)$$

$$N_Y = \frac{M_Y C_Y}{g}, \quad (4)$$

$$M_Y = \begin{cases} 0,7C_Y + 6, & 10 \leq C_H \leq 60 \\ 48, & C_Y > 60 \end{cases}, \quad (5)$$

$$\eta^2 = \frac{0,53C_Y - 4,1}{C_Y - 2}, \quad (6)$$

$$C_Y = \frac{h_a^{\frac{1}{6}}}{n_M}, \quad (7)$$

$$v_a = C_Y \sqrt{Jh_a}, \quad (8)$$

$$k = \frac{u\Gamma}{1 - \Gamma}, \quad (9)$$

где  $h_b$  – толщина донных отложений;  $\Delta h_b$  – изменение высотной отметки дна;  $G_s$  – вертикальная составляющая расхода наносов с поверхности дна, рассчитываемая по формуле (2);  $\lambda$  – пористость грунта;  $\Delta t$  – расчётный временной интервал;  $S$  – содержание взвешенных наносов (мутность потока);  $S_{ss}$  – мутность взмыва, определяемая по формулам (3)–(6);  $u$  – средняя гидравлическая крупность частиц диаметром  $D_{as}$ ;  $k$  – коэффициент пропорциональности, связанный с гидромеханическим параметром наносов  $\Gamma$  формулой (9);  $h_a$  – средняя глубина потока;  $C_Y$  – коэффициент Шези в формуле (7);  $n_M$  – коэффициент шероховатости.

Коэффициенты шероховатости  $n_M$  определялись обратным расчётом по формулам Маннинга и Шези (7, 8) при расходе воды 3978 м<sup>3</sup>/с для каждого профиля: № 1 – 0,0104; № 2 – 0,0169; № 3 – 0,0507; № 4 – 0,0469. Средние глубины и скорости течения в рукаве Хамлуонг вычислялись по зависимостям от расхода воды, полученным для каждого профиля. Средняя мутность ориентировочно принята (при условии среднегодового значения 170 г/м<sup>3</sup> [12]) равной транспортирующей способности потока  $S_{tr}$  по формуле (10), предложенной А.В. Караушевым [18].

$$S_{tr} = \Gamma S_{ss}. \quad (10)$$

В расчётные значения  $\Delta h_b$ , вычисленные по формуле (1), вводились поправки с учётом измеренных в течение 1999–2000 гг. деформаций русла: в створе № 3 – 0,118 м/год; в створе № 4 – 0,200 м/год. Погрешность определения вертикальных деформаций рассчитана согласно [19] при погрешности измерения 0,1 м, масштабе поперечного профиля 1:100 и составляет 0,112 м:

$$\Delta h_b^* = k_\Delta \Delta h_b, \quad (11)$$

где  $k_\Delta$  – соотношение суммы месячных значений  $\Delta h_b$  к измеренному годовому значению (в створе № 3 и 4 – по данным, полученным для соответствующих профилей, в створе № 1 и 2 – по данным для профиля № 3). Результаты расчётов транспортирующей способности потока  $S_{tr}$  и  $\Delta h_b^*$  по формулам (10, 11) приведены в табл. 3.

Полученные результаты свидетельствуют о преобладании размыва донных отложений в верхней части рукава Хамлуонг (створы № 1 и 2) и аккумуляции наносов в его нижней части (створы № 3 и 4), что объясняется снижением средних ско-

ростей течения в результате усиления влияния приливных и сгонно-нагонных явлений и общего увеличения поперечного сечения русла. При этом следует отметить, что наибольшие скорости осаждения наносов в створе № 3 и 4 характерны для сентября и октября (в период муссонных дождей).

**Таблица 3.** Результаты расчёта транспортирующей способности потока ( $S_{tr}$ ) и вертикальных деформаций ( $\Delta h_b^*$ ) русла рукава Хамлуонг (средних значений по поперечному сечению)

**Table 3.** Results of calculation of transporting capacity of the flow ( $S_{tr}$ ) and vertical deformations ( $\Delta h_b^*$ ) of the Hamluong channel (average values along the cross-section area)

Период Period	Створ/Station							
	1 (72)		2 (49,5)		3 (14)		4 (1)	
	км/км							
$S_{tr}$ , мг/дм <sup>3</sup> mg/dm <sup>3</sup>	$\Delta h_b^*$ , мм/с mm/s	$S_{tr}$ , мг/дм <sup>3</sup> mg/dm <sup>3</sup>	$\Delta h_b^*$ , мм/с mm/s	$S_{tr}$ , мг/дм <sup>3</sup> mg/dm <sup>3</sup>	$\Delta h_b^*$ , мм/с mm/s	$S_{tr}$ , мг/дм <sup>3</sup> mg/dm <sup>3</sup>	$\Delta h_b^*$ , мм/с mm/s	
I	158,6	-64,87	156,2	-45,27	141,0	31,55	139,7	55,41
II	143,8	-60,59	130,9	-33,24	115,9	23,86	113,2	41,47
III	131,3	-55,55	118,1	-28,84	103,2	20,26	99,8	34,84
IV	122,4	-51,53	110,0	-26,12	96,6	18,49	93,1	31,69
V	132,2	-55,96	119,0	-29,15	104,0	20,48	100,7	35,23
VI	161,5	-65,27	155,8	-41,86	148,3	33,81	147,4	59,66
VII	178,1	-71,03	174,5	-48,32	177,0	43,01	176,9	76,49
VIII	210,3	-88,42	192,0	-54,17	203,2	51,84	196,6	88,27
IX	229,8	-99,46	203,6	-58,83	217,7	56,85	196,5	88,24
X	231,1	-100,25	204,4	-59,18	218,7	57,21	196,0	87,92
XI	208,6	-87,48	191,1	-53,87	201,9	51,40	196,0	87,94
XII	173,7	-68,76	172,1	-47,49	173,2	41,77	173,2	74,34
Год Year	170,0	-66,85	170,0	-46,78	170,0	40,72	170,0	72,47

2. На следующем этапе исследования выделяются участки с преобладающим размывом и аккумуляцией наносов. Для этого линейной интерполяцией определяется расстояние от морского края дельты до створа, в котором величина  $\Delta h_b^* = 0$ . В целом для года это расстояние составляет 31 км. Затем рассчитываются средние значения концентраций микроэлементов на участках водного объекта с преобладающим размывом и аккумуляцией наносов. Результаты расчёта по рукаву Хамлуонг приведены в табл. 4.

Если концентрации микроэлементов на участках с преобладающим размывом донных отложений и аккумуляцией наносов статистически различаются, то разница между ними может интерпретироваться как результат действия характерных для одного из участков процессов. В частности, повышенное значение концентрации микроэлементов в донных отложениях на участке преобладающей аккумуляции наносов может рассматриваться как результат действия процессов сорбции микроэлементов на оседающих частицах, выведения из раствора малорастворимых соединений и биогеохимических процессов.

Для рукава Хамлуонг была проведена проверка на однородность по средним значениям и дисперсиям с использованием критериев Стьюдента и Фишера при уровне значимости 5 % (критическое значение критерия Стьюдента 2,23, Фишера – 6,23). В результате сделан вывод о том, что статистически значимые различия характерны для мышьяка и ртути (табл. 4).

**Таблица 4.** Средние концентрации микроэлементов в донных отложениях рукава Хамлуонг на участках с преобладающей аккумуляцией и размывом, мг/кг

**Table 4.** Average concentrations of microelements in the bed load sediments in the Hamluong channel on the sites with prevailing accumulation and scour, mg/kg

Показатель/Index	Zn	Cu	Pb	Cd	As	Hg
Участок с преобладающей аккумуляцией наносов (0–31 км от морского края дельты) Site with prevailing accumulation of sediments (0–31 km from the delta sea edge)						
Среднее арифметическое $A$ Arithmetic mean $A$	98,689	35,110	4,977	1,456	7,617	0,131
Погрешность расчёта $\delta_A$ Calculation error $\delta_A$	3,507	1,154	0,603	0,251	0,276	0,035
Суммарная погрешность $\delta_S$ Overall error $\delta_S$	4,159	1,316	0,929	0,336	0,759	0,127
Участок с преобладающим размывом донных отложений (31–75 км от морского края дельты) Site with prevailing scour of bed load sediments (31–75 km from the delta sea edge)						
Среднее арифметическое $A$ Arithmetic mean $A$	92,265	32,564	3,154	1,021	5,531	0,090
Погрешность расчёта $\delta_A$ Calculation error $\delta_A$	6,322	0,970	0,466	0,287	0,510	0,007
Суммарная погрешность $\delta_S$ Overall error $\delta_S$	6,705	1,158	0,847	0,364	0,872	0,123
Критерий Стьюдента $k_{St}$ Student criterion $k_{St}$	0,73	1,54	1,63	0,99	2,94	4,06
Критерий Фишера $k_F$ Fischer criterion $k_F$	0,22	0,99	0,47	0,54	0,21	0,16

Примечание: суммарная погрешность определена по формуле  $\delta_S = \sqrt{\delta_m^2 + \delta_A^2}$ , где  $\delta_A$  – погрешность расчёта среднего арифметического по формуле  $\delta_A = \sigma N^{-0.5}$ ;  $\delta_m$  – погрешность измерения (для используемого метода анализа);  $N$  – объём выборки;  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение.

Note: the overall error was determined by the formula  $\delta_S = \sqrt{\delta_m^2 + \delta_A^2}$ , where  $\delta_A$  is the error of the arithmetic mean calculation by the formula  $\delta_A = \sigma N^{-0.5}$ ;  $\delta_m$  is the calculation error (for the analysis technique applied);  $N$  is the sampling volume;  $\sigma$  is the standard deviation.

3. Затем рассчитывается масса микроэлементов в донных отложениях на участке с преобладанием аккумуляции наносов (табл. 5) с учётом пористости грунта при условии плотности наносов 2650 кг/м<sup>3</sup> [18]. Объём аккумуляции наносов определяется суммированием частных объёмов наносов между расчётными створами, которые, в свою очередь, вычисляются умножением расстояния между смежными створами на среднее значе-

ние площади поперечного сечения (в створе 31 км от морского края дельты площадь сечения принимается равной нулю). В случае рукава Хамлуонг объём аккумуляции наносов составил 7927753 м<sup>3</sup>/год, масса – 12605128 т/год.

4. На основе полученных данных проводится расчёт массы осажённых микроэлементов умножением массы наносов, аккумулируемых на участке, на средние значения концентрации на участках преобладающего размыва донных отложений и аккумуляции наносов (табл. 5). Разница между полученными значениями аккумуляции As и Hg (пункт 2 рассматриваемого раздела) в случае рукава Хамлуонг интерпретируется как результат действия преимущественно процессов сорбции микроэлементов на оседающих частицах и выведения из раствора малорастворимых соединений (табл. 5). Вклад биогеохимических процессов непосредственно для крупных рукавов в дельте Меконга представляется менее значительным по сравнению с другими факторами (вследствие заметно более высоких скоростей течения относительно скоростей самоочищения вод согласно [20]). Но их роль, предположительно, возрастает при уменьшении скоростей течения в малых протоках и пойменных водоёмах.

В целом анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что 27 % от массы аккумуляции мышьяка в донных отложениях в нижней части рукава Хамлуонг и 31 % массы аккумуляции ртути связано с сорбцией микроэлементов на частицах осаждающихся наносов и с выведением из раствора малорастворимых соединений. Соответственно, 73 и 69 % массы аккумуляции указанных микроэлементов связаны с осаждением взвешенных частиц, в составе которых присутствуют As и Hg (иными словами – со взвешенной формой миграции в потоке). Формирование массы прочих изученных микроэлементов (Zn, Cu, Pb, Cd) в донных отложениях рукава Хамлуонг в основном также связывается с аккумуляцией взвешенных наносов (табл. 5).

В целях подтверждения этого вывода были выполнены термодинамические расчёты с использованием программного комплекса Solution+ [21], которые показали, что, во-первых, воды рукава Хамлуонг недонасыщены относительно первичных алюмосиликатов и незначительно пересыщены относительно кварца. Во-вторых, в направлении от границы с Камбоджей до морского края дельты наблюдается уменьшение недонасыщенности поверхностных вод или даже их пересыщение относительно карбонатных минералов на участке до 13 км от морского края дельты (табл. 6). Таким образом, кроме «механического» изменения массы металлов в донных отложениях, связанного с аккумуляцией или эрозией последних, имеются условия для накопления химических элементов в донных отложениях вследствие потенциального усиления образования малорастворимых соединений по мере приближения к морю.

**Таблица 5.** Масса аккумуляции микроэлементов на участке с преобладающей аккумуляцией наносов (0–31 км от морского края дельты), т/год**Table 5.** Weight of accumulation of microelements on the site with prevailing alluviation accumulation (0–31 km from the delta sea edge), t/year

Показатель/Index		Zn	Cu	Pb	Cd	As	Hg
Масса аккумуляции Accumulation weight	$M_1$ при средней концентрации, рассчитанной для участка 0–31 км от моря, т/год $M_1$ at average concentration calculated for the site 0–31 km from the sea, t/year	1243,987	442,566	62,736	18,353	96,013	1,651
	$M_2$ при средней концентрации, рассчитанной для участка 31–75 км от моря, т/год $M_2$ at average concentration calculated for the site 31–75 km from the sea, t/year	1163,012	410,473	39,757	12,870	69,719	1,134
Формальная разница ( $M_1 - M_2$ ) Formal difference ( $M_1 - M_2$ )	без учёта проверки на однородность, т/год without test for homogeneity, t/year	80,975	32,093	22,979	5,483	26,294	0,517
	с учётом проверки на однородность, т/год considering test for homogeneity, t/year	0	0	0	0	26,294	0,517
	с учётом проверки на однородность, % от $M_1$ considering test for homogeneity, % of $M_1$	0	0	0	0	27,4	31,3

**Таблица 6.** Значения индекса насыщения вод рукава Хамлуонг в январе 2014 г.**Table 6.** Values of saturation index of the Hamluong channel water in 2014, January

Формула/Formula	Расстояние от морского края дельты, км Distance from the delta sea edge, km		
	75	35	9
$\text{CaCO}_3$ (кальцит) = $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	-2,33	-1,93	-0,72
$\text{CaCO}_3$ (кальцит) + $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$	-2,27	-1,88	-0,39
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (доломит) = $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2\text{CO}_3^{2-}$	-4,24	-3,41	-0,06
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (доломит) + $2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 4\text{HCO}_3^-$	-4,13	-3,31	0,59
$\text{MgCO}_3$ (магнезит) + $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Mg}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$	-5,80	-5,38	-2,96
$\text{SiO}_2$ (кварц) + $2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_4\text{SiO}_4^0$	0,37	0,36	0,32
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (анортит) + $3\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 = \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (каолинит) + $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$	-258,0	-257,3	-257,3
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (анортит) + $2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (каолинит) + $\text{Ca}^{2+}$	-23,10	-21,52	-21,70
$2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (альбит) + $11\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 = \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (каолинит) + $2\text{Na}^+ + 2\text{HCO}_3^- + 4\text{H}_4\text{SiO}_4^0$	-10,74	-9,87	-6,00
$3\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ (ортоклаз) + $2\text{H}^+ + 12\text{H}_2\text{O} = \text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (мусковит) + $2\text{K}^+ + 6\text{H}_4\text{SiO}_4^0$	-23,10	-22,29	-19,30

Примечание: отрицательные значения свидетельствуют о недонасыщенности раствора, положительные – о пересыщении.

Note: negative values indicate the solution undersaturation, the positive ones indicate its oversaturation.

## Выводы

Состояние поверхностных вод и донных отложений в дельте Меконга в целом оценивается как неудовлетворительное, причём содержание микроэлементов в донных отложениях увеличивается по мере приближения к морю. Важным фактором этого увеличения являются русловые процессы.

Для количественной оценки связи геохимических и гидрологических процессов предложена методика, основанная на использовании метода А.В. Караушева [18] для расчёта русловых деформаций. Её апробация показала, что, во-первых, аккумуляция наносов преобладает на участке рукава Хамлуонг 0–31 км от морского края дельты. Во-вторых, в пределах этого участка ежегодно оседает, т/год: Zn – 1244; Cu – 443; Pb – 63; Cd – 18; As – 96; Hg – 1,7. В-третьих, в дельте Меконга основная часть массы Zn, Cu, Pb, Cd, 73 % массы As и 69 % массы Hg формируется за счёт осаждения частиц наносов, с которыми (во взвешенной форме) переносятся указанные микроэлементы. 27 % массы As и 31 % массы Hg связано с сорбцией на осаждающихся частицах и выведением из раствора малорастворимых соединений.

Для сельскохозяйственного использования наиболее оптимально применение донных отложений, изъятых в дельте Меконга на участке от 31 до 15 км, где: 1) преобладает аккумуляция донных отложений над их размывом (табл. 5); 2) содержание макро- и микроэлементов меньше значений, при которых возможно засоление почв и угнетение неспецифических видов растений. Донные отложения на участке 0–15 км с наиболее высокими концентрациями токсичных микроэлементов целесообразно использовать для строительных нужд при инженерной защите прибрежных территорий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доан Ван Фук. Исследование воды для сельского хозяйства. – Бенче: Департамент науки и технологии, 2012. – 77 с. / на вьетнам. яз.
2. Статистический ежегодник провинции Бентре 2012 года / под ред. Ле Тхи Тху Нгуэт и др. – Бентре: Департамент статистики провинции Бентре, 2012. – 98 с. / на вьетнам. яз.
3. Совместное управление устьями реки Меконг. – СРВ, Провинция Бенче: Министерство сельского хозяйства и развития сельских местностей, 2010. – 272 с. / на вьетнам. яз.
4. Тон Тхат Хань. Экологический мониторинг в провинции Бен Тре. – Бен Тре: Департамент науки и технологии, 2013. – 139 с. / на вьетнам. яз.
5. Хо Тронг Тиен. Исследование изменений боковой приточности речных каналов в провинции Бенче, планирование решений по инженерной защите территорий. – СРВ, Бенче: Научно-исследовательский Институт водного хозяйства юга, 2001. – 98 с. / на вьетнам. яз.
6. Хо Тронг Тиен. Планирование орошения в провинции Бен Тре. – Бен Тре: Южный гидротехнический институт, Академия науки и технологий Вьетнама, 2011. – 43 с. / на вьетнам. яз.
7. Diagnostic study of water quality in the Lower Mekong Basin // Mekong River Commission Technical Paper. № 15. – Vientiane, LAO DPR: MRC, 2007. – 58 p.
8. The planning Atlas of the Lower Mekong River Basin // Mekong River Commission. – Vientiane: MRC, 2011. – 104 p.
9. An assessment of water quality in the Lower Mekong Basin // Mekong River Commission Technical Paper, № 19. – Vientiane, LAO DPR: MRC, 2008. – 70 p.
10. Hurt B.T., Jones M.J., Pistone G. Transboundary Water Quality Issues in the Mekong River Basin // Mekong River Commission. – Australia: Water Studies Centre, Monash University, 2001. – 77 p.
11. The Mekong River Report Card on Water Quality. V. 2. Assessment of Potential Human Impacts of Mekong River water quality // Mekong River Commission. – Vientiane, Lao DPR: MRC, 2010. – 15 p.
12. Михайлов В.Н., Аракельянц А.Д. Особенности гидрологических и морфологических процессов в устьевой области р. Меконг // Водные ресурсы. – 2010. – Т. 37. – № 3. – С. 259–273.
13. River changes along the Mekong River: Remote sensing detection in the Vietnam – Nong Khai area / Kumu Matti, X.X. Lu, A. Rasphone, J. Sarkkula, J. Koponen // Quaternary International. – 2008. – V. 196. – P. 1000–1012.
14. Meshkova L.V., Carling P.A. The geomorphological characteristics of the Mekong River in northern Cambodia: A mixed bedrock-alluvial multi-channel network // Geomorphology. – 2012. – № 147–148. – P. 2–17.
15. Prathumratana L., Sthiannopkao S., Kim K.W. The relationship of climatic and hydrological parameters to surface water quality in the lower Mekong River // Environment International. – 2008. – № 34. – P. 860–866.
16. Государственная техническая норма качества воды (QCVN 38:2011/ VTNMT). – Ханой: Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды, 2011. – 6 с. / на вьетнам. яз.
17. Государственный технический стандарт качества речных донных отложений (QCVN XX:2012/ VTNMT). – Ханой: Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды, 2012. – 21 с. / на вьетнам. яз.
18. Караушев А.В. Речная гидравлика. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 416 с.
19. ВСН 163–83. Учёт деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов). – М.: ВНИИСТ Миннефтегазстрой, Госкомгидромет СССР, Госстрой СССР. 1985. – 142 с.
20. Справочник по гидрохимии / под ред. А.М. Никанорова. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 391 с.
21. Савичев О.Г., Колоколова О.В., Жуковская Е.А. Состав и равновесие донных отложений р. Томь с речными водами // Геоэкология. – 2003. – № 2. – С. 108–119.

Поступила 28.09.2014 г.

UDC 556.06:551.482.212

## RELATIONS BETWEEN MICROELEMENT COMPOSITION OF BED LOAD SEDIMENTS AND SEDIMENTATION IN DELTA OF THE MEKONG RIVER (VIETNAM)

**Phung Thai Duong,**

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue,  
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: phungthaiduongdhd@gmail.com

**Oleg G. Savichev,**

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue,  
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: OSavichev@mail.ru

**Relevance.** The research of formation mechanisms of natural and natural-anthropogenous geochemical anomalies in water objects plays the extremely important role in geology and geocology. It is the required stage in developing long-term forecasts of ecosystems state and planning nature protection actions. One of the key aspects of the problem – revealing the relations between geochemical and hydrological processes in a delta of the big river – is considered by the example of the largest river of Indochina – the Mekong river. The choice of the object is caused by the value of the river in social and economic development of southeast Asia.

**The aim of the research** is to reveal the relations between the formation of bed load sediments in the delta of the Mekong river (Vietnam) and their microelement composition.

**Methods of the research:** landscape-geochemical and geography-hydrological methods, mathematical modelling of hydrological processes.

**Results and conclusions.** The authors have obtained the data on microelement composition of the bed load sediments in the delta of the Mekong river and have estimated the deformations of the river channel (the Hamluong channel) using the method of A.V. Karashev by the surveying works in 1999 and 2000 in cross-sections, located in 72, 49, 14, 1 km from sea edge of delta. It was ascertained that accumulation of sediments prevails on a site of the Hamluong channel of 0–31 km from sea edge of the delta. Based on the data of the geochemical approbation which has been carried out by Phung Thai Duong in 2013–2014 it is shown, that within this site 1244 tons of Zn; 443 tons of Cu; 63 tons of Pb; 18 tons of Cd; 96 tons of As; 1,7 tons of Hg annually settle. In the delta of the Mekong river the basic part of weights of Zn, Cu, Pb, Cd, As 73 wt. % and Hg 69 wt. % are formed due to sedimentation of particles with the specified microelements (in the suspended form). As 27 wt. % and Hg 31 wt. % are related with sorbtion on besieged particles and removing poorly soluble substances from a solution. The authors made a conclusion that the application of the bed load sediments withdrawn in the delta of the Mekong river on a site from 31 up to 15 km is optimal for agricultural use. It is appropriate to use the river sediments on a site of 0–15 km with the highest concentrations of toxic microelements for building needs at engineering protection of coastal territories.

**Key words:**

Delta of the Mekong river, Vietnam, river sediments, microelement composition, channel deformations.

**REFERENCES**

- Doan Van Phuk. *Issledovanie vody dlya selskogo khozyaistva* [Research of water for agriculture]. Benche, Department of science and technology, 2012. 77 p. / in Vietnam.
- Statisticheskiy ezhegodnik provintsii Bentre 2012 goda* [A statistical year-book of Bentre province of 2012]. Ed. by Le Tkhi Tkhu Nguet. Bentre, Department of Bentre province statistics, 2012. 98 p. / in Vietnam.
- Sovmestnoe upravlenie ustyami reki Mekong* [A joint management of the Mekong river delta]. SRV, Benche, Ministry of Agriculture and Development of rural areas, 2010. 272 p. / in Vietnam.
- Ton Tkhat Khan. *Ecologicheskoy monitoring v provintsii Bentre* [Ecological monitoring in Bentre province]. Bentre, Department of science and technology, 2013. 139 p. / in Vietnam.
- Kho Trong Tien. *Issledovanie bokovoy pritochnosti rechnykh kanalov v provintsii Benche, planirovanie resheniy po inzhenernoy zashchite territoriy* [Research of changes in lateral flow to river channels in Benche provinces, planning the decisions on engineering protection of territories]. SRV, Benche, Research Institute of water industry in the south, 2001. 98 p. / in Vietnam.
- Kho Trong Tien. *Planirovanie orosheniya v provintsii Bentre* [Planning of irrigation in Bentre province]. Bentre, South Hydro-technical Institutre, 2011. 43 p. / in Vietnam.
- Diagnostic study of water quality in the Lower Mekong Basin. *Mekong River Commission Technical Paper, № 15*. Vientiane, LAO DPR: MRC, 2007. 58 p.
- The planning Atlas of the Lower Mekong River Basin. *Mekong River Commission*. Vientiane, MRC, 2011. 104 p.
- An assessment of water quality in the Lower Mekong Basin. *Mekong River Commission Technical Paper, № 19*. Vientiane, LAO DPR: MRC, 2008. 70 p.
- Hurt B.T., Jones M.J., Pistone G. *Transboundary Water Quality Issues in the Mekong River Basin*. *Mekong River Commission*. Australia, Water Studies Centre, Monash University, 2001. 77 p.
- The Mekong River Report Card on Water Quality. V. 2. Assessment of Potential Human Impacts of Mekong River water quality. *Mekong River Commission*. Vientiane, Lao DPR: MRC, 2010. 15 p.
- Mikhaylov V.N., Arakeliants A.D. *Osobnosti gidrologicheskikh i morfologicheskikh protsessov v ustievoy oblasti r. Mekong* [The feature of hydrological and morphological processes in delta of the Mekong river]. *Vodnye resursy – Water resources*, 2010, vol. 37, no. 3, pp. 259–273.
- Kumu Matti, Lu X.X., Rasphone A., Sarkkula J., Koponen J. *River changes along the Mekong River: Remote sensing detection in the Vietnam – Nong Khai area*. *Quaternary International*, 2008, vol. 196, pp. 1000–1012.
- Meshkova L.V., Carling P.A. *The geomorphological characteristics of the Mekong River in northern Cambodia: A mixed bedrock–alluvial multi-channel network*. *Geomorphology*, 2012, no. 147–148, pp. 2–17.
- Prathumratana L., Sthiannopkao S., Kim K.W. *The relationship of climatic and hydrological parameters to surface water quality in the lower Mekong River*. *Environment International*, 2008, no. 34, pp. 860–866.
- Gosudarstvennaya tekhnicheskaya norma kachestva vody* [The state technical norm of water quality] (QCVN 38:2011/ BTNMT). Khanhoi, Ministry of Natural Resources and Environment Protection, 2011. 6 p. / in Vietnam.
- Gosudarstvenny tekhnicheskyy standart kachestva rechnykh donnykh otlozheniy* [The state technical quality standard of river sediments] (QCVN XX:2012/ BTNMT). Khanhoi, Ministry of Natural Resources and Environment Protection, 2012. 21 p. / in Vietnam.
- Karashev A.V. *Rechnaya gidravlika* [A river hydraulics]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969. 416 p.
- VSN 163–83. Uchet deformatsy rechnykh rusel i beregov vodoevov v zone podvodnykh perekhodov magistralnykh truboprovodov (neftegazoprovodov)* [The account of deformations of river channels and coast of reservoirs in a zone of underwater transitions of the main pipelines (oil and gas pipelines)]. Moscow, VNIIST Minneftegazstroj, Goskomgydromet SSSR, Gosstroj SSSR. 1985. 142 p.
- Spravochnik po gidrokhimii* [The directory in hydrochemistry]. Ed. by A.M. Nikanorov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989. 391 p.
- Savichev O.G., Kolokolova O.V., Zhukovskaya E.A. *Sostav i ravnovesie donnykh otlozheniy r. Tom s rechnymi vodami* [Composition and balance of river sediments of the Tom river with river waters]. *Geoekologia – Geoecology*, 2003, no. 2, pp. 108–119.

Received: 28 September 2014.