

## ГЕОХИМИЯ

УДК 556.54 (550.42)

### ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ХИМИЧЕСКИМ СОСТАВОМ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД В УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ РЕКИ МЕКОНГ (ВЬЕТНАМ)

О.Г. Савичев, Н.В. Гусева

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия*

Разработана методика моделирования изменений удельной электропроводности и содержаний Cu и Pb в поверхностных водах и вытяжках из донных отложений в устьевой области Меконга. Выполнено обоснование зависимости концентраций ряда микроэлементов в вытяжках из донных отложений в дельте Меконга от величины pH поверхностных вод – важного фактора направленности процессов растворения, осаждения и соосаждения в зоне смешения морских и речных вод, а также формирования сорбционной емкости донных отложений.

**Ключевые слова:** дельта Меконга, смешение морских и речных вод, химический состав.

#### Введение

Исследование устьевых областей больших рек представляет значительный научный интерес с точки зрения изучения геохимических и геоэкологических условий в водных объектах и их водосборах и закономерностей их пространственно-временных изменений [Михайлов и др., 1999]. Общее представление о механизмах смешения речных и морских вод может быть получено в рамках концепции А.П. Лисицына о маргинальных фильтрах океанов. В соответствии с ней в относительно узкой зоне смешения происходят флокуляция и коагуляция речных наносов, биоассимиляция и биофильтрация, образование малорастворимых соединений железа и алюминия, сорбция на них и на осаждающихся речных наносах растворенных и коллоидных форм, в результате чего на таких участках откладывается 93–95 % взвешенных и 20–40 % растворенных веществ, выносимых в море с речным стоком [Лисицын, 1994].

Указанная концепция подтверждается материалами наблюдений за геохимическим состоянием устьевых областей рек Северной Евразии, результатами экспериментальных работ и математического моделирования процессов смешения морских и речных вод [Савенко, 1999; Гордеев, 2009; Савенко, Грамм-Осипов, Марьяш, 2009; Савенко, Покровский, Кожин, 2011; Лазарева и др., 2017]. Тем не менее ряд вопросов остался недостаточно раскрытым. В частности, не всегда очевиден механизм взаимодействия между поверхностными водами и донными отложениями в зоне смешения речных и морских вод, что негативно отражается на эффективности мероприятий по использованию и охране природных ресурсов в ряде регионов мира, в том числе в преде-

лах дельты одной из крупнейших рек мира – Меконга [Хоанг, 1990; Hart et al., 2001; Nguyen, Savenije, 2006; Hoa et al., 2007].

В пределах водосбора этой реки, соответствующего участкам территории Китая, Лаоса, Мьянмы, Тайланда, Камбоджи и Вьетнама, проживают более 50 млн человек. Соответственно, неизбежно происходит изменение миграционных циклов химических элементов, в результате которого, например, вероятно загрязнение поверхностных вод и донных отложений, которые могут использоваться для сельскохозяйственного производства в дельте Меконга (донные отложения как грунт, поверхностные воды – для полива). С учетом интрузии соленых морских вод это несет определенные социально-экономические риски, что обуславливает актуальность изучения процессов формирования химического состава поверхностных вод и донных отложений, а также разработки методов оперативного и экономически обоснованного обнаружения геохимических аномалий и планирования мероприятий по управлению качеством поверхностных вод и донных отложений.

В одной из последних работ по этой теме Фунг Тхай Зыонгом [Фунг, 2015] на основе статистического анализа данных геохимических наблюдений был предложен способ индикации повышенных концентраций ряда микроэлементов (Cu, Pb, Cd, As, Hg) в донных отложениях дельты Меконга по величине pH поверхностных вод. В данной работе рассмотрены обоснование и уточнение этого способа.

#### Объект и методика исследований

Дельта Меконга площадью 46 700 км<sup>2</sup> имеет сложное строение в виде двух комплексов рука-

вов – Тиензанг и Хаузанг [Михайлов, Аракельянц, 2010; Фунг, 2015]. В составе последнего комплекса выделяется наиболее крупный рукав – Хамлуонг, который и является основным объектом исследований.

Исходной информацией послужили результаты отбора проб поверхностных вод и донных отложений в рукаве Хамлуонг на участке от 75 до 4,2 км от морского края дельты (рис. 1), приведенные в

[Савичев, Фунг, 2014; Фунг, Савичев, Нгуен, 2015]. Информация о промерных работах на рукаве Хамлуонг в створах 72; 49,5; 14 и 1 км от морского края взята из работы [Тон, 2013], а данные об измеренных уровнях и расходах воды Меконга в створе Тан Чау – на сайте The Mekong River Commission [<http://archive.iwlearn.net/mrcmekong.org>]. Более подробная геохимическая и гидрологическая информация приведена в [Фунг, 2015].

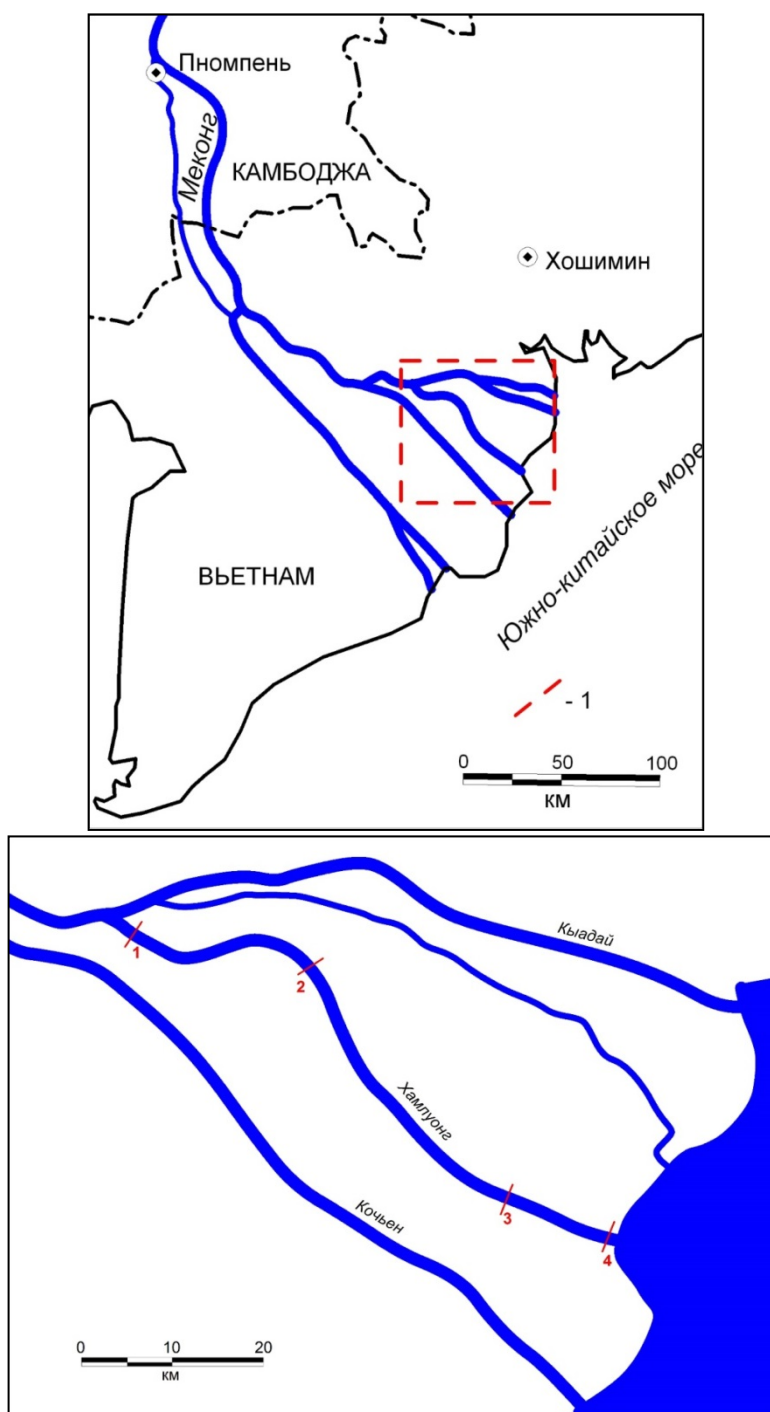


Рис. 1. Схема расположения исследуемого участка дельты реки Меконг и промерных створов (1–4) по данным [Тон, 2013; Фунг, 2015]

Fig. 1. The layout of an arrangement of a researched site of delta of the river Mekong and premeasured cross-sections (1–4) on the data [Tong, 2013; Phung, 2015]

Методика исследования включала в себя разработку, апробацию и анализ математической модели трансформации. Модель основана на аналитическом решении одномерного стационарного уравнения диффузии (1):

$$v \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \varphi_p + \varphi_s, \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация вещества в поверхностных водах;  $x$  – пространственная координата;  $v$  – скорость течения;  $D$  – коэффициент гидродисперсии;  $\varphi_p$  и  $\varphi_s$  – функции, описывающие, согласно [Jacob, 1997; Лехов, 2010], изменение концентрации вещества в результате реакций растворения – осаждения и сорбции – десорбции по формулам (2) и (3) соответственно:

$$\varphi_p = k_p \cdot (C_p - C), \quad (2)$$

$$\varphi_s = k_s \cdot (S - k_c \cdot C), \quad (3)$$

$$k_p = k_{p,01} \cdot f_1(T) + k_{p,02} \cdot f_2(v_{al}, D_{al}), \quad (4)$$

$$k_c = k_{c,0} \cdot f_3(T) \cdot (S_m - S), \quad (5)$$

$$S_m = S_{m,0} \cdot f_4(T, pH), \quad (6)$$

где  $C_p$  – значение, ориентировочно соответствующее условно равновесному состоянию, а в случае смешения морских и речных вод – концентрации вещества в морских водах;  $S$  – концентрация вещества в твердой фазе донных отложений;  $k_p$  – коэффициент массообмена, пропорциональный некоторым постоянным значениям  $k_{p,01}$  и  $k_{p,02}$  при определенных значениях температуры воды  $T_f$ , средних на участке (протяженностью  $L$ ) значениях скорости течения  $v_{al}$  и коэффициента гидродисперсии  $D_{al}$ , а также функциям  $f_1$  и  $f_2$ , описывающим отклонения фактических значений температуры воды, скорости течения и коэффициента гидродисперсии от  $T_f$ ,  $v_{al}$ ,  $D_{al}$  соответственно (4);  $k_s$  – коэффициент сорбционного обмена;  $k_c$  – коэффициент, характеризующий соотношение сорбции и десорбции в зависимости (5) от некоторого постоянного значения  $k_{c,0}$  при определенных значениях температуры воды  $T_c$ , функции  $f_3$ , описывающей отклонение фактических значений температуры воды от  $T_c$ , а также разности между сорбционной емкостью донных отложений  $S_m$  и концентрацией вещества  $S$ ; сорбционная емкость  $S_m$  (6), в свою очередь, определяется некоторым постоянным значением  $S_{m,0}$ , характерным для определенного минерального и химического состава донных отложений с учетом активных центров сорбции и ионного обмена в виде глинистых минералов, гидроокисей металлов и гуминовых веществ, состояние которых приближенно описывается функцией  $f_4$  [Lasaga, 1995; White, 1995; Крайнов, Рыженко, Швеиц, 2004; Nguyen, Savenije, 2006; Robinson et al., 2006].

С учётом указанных обозначений уравнение (1) принимает вид (7), а решение последнего – (9) [Loucks, Van Beek, 2005; Benedini, Tsakiris, 2013]. Частное решение (7) при существенном преоблада-

нии скоростей процессов сорбции и десорбции, растворения и осаждения, ионного обмена по сравнению с адвективно-диффузионным переносом соответствует уравнениям (10), (11), которые при малых значениях  $k_p$  и  $k_p \cdot C_p$  и  $k_p=1$  переходят в уравнение Лэнгмюра:

$$D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + k_s \cdot S + k_{p,0} \cdot f_1 \cdot C_p - k_r \cdot C = 0, \quad (7)$$

$$k_r = k_s \cdot k_{c,0} \cdot f_2 \cdot (S_{m,0} \cdot f_3 - S) + k_p, \quad (8)$$

$$C = C_e + (C_0 - C_e) \cdot$$

$$\exp\left(\frac{x \cdot v_{al}}{2 \cdot D_{al}} \cdot \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4 \cdot k_r \cdot D_{al}}{v_{al}^2}}\right)\right), \quad (9)$$

$$C_e = \frac{k_s \cdot S + k_p \cdot C_p}{k_s \cdot k_{c,0} \cdot f_3 \cdot (S_m - S) + k_p}, \quad (10)$$

$$S = \frac{k_{c,0} \cdot f_3 \cdot S_m \cdot C - \frac{k_p}{k_s} \cdot (C_p - C)}{1 + k_{c,0} \cdot f_3 \cdot C}, \quad (11)$$

где  $C_0$  – начальное значение концентрации вещества, принимаемое в случае изучения смешения морских и речных вод равным концентрации в речных водах (в створе 75 км от морского края дельты);  $k_r$  – удельная скорость трансформации вещества в результате процессов растворения и осаждения, сорбции и десорбции, ионного обмена (8).

Коэффициенты  $k_p$ ,  $k_s$ ,  $k_c$  учитывают температуру среды и условия контакта между водными массами, взвешенными и влекомыми наносами, донными отложениями, что определяет индивидуальные особенности структуры функций  $f_1$  и  $f_2$  применительно к конкретному водному объекту. Аргументами функции  $f_1$  обычно являются величины, характеризующие турбулентный обмен через абсолютные и / или относительные значения средней скорости течения и коэффициенты гидродисперсии [Мелиорация... 1988; Справочник... 1989].

Значения скорости течения и глубины рукава Хамлуонг в створах проведения промерных работ [Тон, 2013] определялись по зависимостям от расхода воды, который был принят по состоянию на 01.01.2013 г. в размере 932 м³/с. Уклон водной поверхности принят в размере 0,008 м/км [Фунг, 2015]. В прочих створах скорость и коэффициент гидродисперсии оценивались путем интерполяции между значениями в промерных створах. Коэффициент гидродисперсии ориентировочно принят, согласно А.В. Караушеву [Караушев, 1969], по формулам:

$$D = \frac{v \cdot h}{N_{ш}}, \quad (12)$$

$$N_{ш} = \frac{M_{ш} \cdot C_{ш}}{g}, \quad (13)$$

$$M_{ш} = \begin{cases} 0,7 \cdot C_{ш} + 6; & 10 \leq C_{ш} \leq 60 \\ 48; & C_{ш} > 60 \end{cases}, \quad (14)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $h$  – средняя глубина в створе;  $C_{ш}$  – коэффициент Шези, определяемый по формуле Маннинга:

$$C_{ш} = \frac{h^{1/6}}{n_r}, \quad (15)$$

где  $n_r$  – коэффициент шероховатости. Средние на участке значения характеристики  $Z_{al}$  (одна из величин –  $v$ ,  $h$  и  $D$ ) определялись по формуле

$$Z_{al} = \frac{\sum \frac{(Z_i + Z_{i-1})}{2} \cdot l_{i-1,i}}{L}, \quad (16)$$

где  $l_{i-1,i}$  – расстояние между створами  $(i-1)$  и  $(i)$ ;  $L$  – общая протяженность участка.

Подбор параметров сорбционной емкости  $S_m$ , функций  $f_1, f_2, f_3, f_4$  в уравнениях (4)–(6) проводился средствами пакета MS Excel методом общего понижающего градиента. В качестве критерия оптимальности использовалось соотношение Нэша – Сатклифа [Nash, Sutcliffe, 1970] при условии [Бефани, Калинин, 1983]:

$$NS = 1 - \frac{\sum (Z_m - Z_s)^2}{\sum (Z_m - Z_{ma})^2} > 0,36, \quad (17)$$

где  $Z_m$  и  $Z_s$  – измеренные и вычисленные значения величины  $Z$ ;  $Z_{ma}$  – среднее измеренное значение величины  $Z$ .

### Результаты исследования и их обсуждение

Апробация модели (9) проведена по данным, полученным Фунг Тхай Зыонгом в январе 2013 г. об удельной электропроводности поверхностных вод и водной вытяжки из донных отложений, содержаниях Cu и Pb в поверхностных водах и кислотной вытяж-

ке из донных отложений рукава Хамлуонг в 75,0; 70,0; 64,5; 57,2; 44,5; 41,6; 35,0; 28,0; 20,5; 15,2; 9,2 и 4,2 км от морского края дельты [Фунг, Савичев, Нгуен, 2015]. Значения  $C_p$  для удельной электропроводности определены по данным о солёности прибрежных морских вод и зависимости между солёностью и удельной электропроводностью по данным [Океанология... 1979; An Assessment... 2008; Chen et al., 2010], а для меди и свинца – подбором.

Анализ полученных результатов показал, во-первых, возможность использования системы уравнений (1–16) для описания изменения физико-химических и геохимических показателей состояния водных объектов в зоне смешения речных и морских вод в дельте Меконга (табл. 1, рис. 2–4). При этом следует отметить, что получено лучшее приближение к результатам измерений (по рукавам Диньан, Чанье, Кочьен), чем с использованием решений упрощенного стационарного уравнения адвективно-го переноса [Nguyen, Savenije, 2006].

Во-вторых, удовлетворительное соответствие вычисленных значений измеренным достигается уже при допущении незначительного адвективно-диффузионного переноса (10), (11). Применение уравнения (9) не приводит к существенному улучшению результатов вычислений (табл. 1).

Таблица 1

Значения показателя качества моделирования  $NS^*$  (17)

Table 1

Values of a parameter of quality of modelling  $NS^*$  (17)

Условия моделирования	Удельная электропроводность	Концентрация меди	Концентрация свинца
Поверхностные воды без учета адвективно-диффузионного переноса	0,99	0,85	0,59
Поверхностные воды с учетом адвективно-диффузионного переноса	0,99	0,85	0,59
Вытяжка из донных отложений*	0,89	0,66	0,51

Примечание. \* расчет показателя проводился для створов в 72,0–4,2 км от морского края дельты; соответственно, вычисленные значения в створе 75 км от морского края дельты на рис. 2–4 не приведены; \*\* удельная электропроводность водной вытяжки, а концентрации Cu и Pb – в кислотной.

Note: \* calculation of a parameter was carried out for cross-sections at 72.0–4.2 kms from sea edge of delta; accordingly, the calculated values in створе 75 kms from sea edge of delta on fig. 2–4 are not resulted; \*\* specific electric conductivity of a water extract, and concentration Cu and Pb – in acid extract.

В-третьих, наибольшие значения показателя  $NS$  достигаются при допущении  $f_3 = 1$  и определении значений  $k_p, S_m$  по формулам вида (18), (19):

$$k_p = k_{p,01} \cdot \exp\left(\frac{k_{p,T}}{273,15+T}\right) + k_{p,02} \cdot \left(\frac{D}{v} - k_{p,v,D}\right)^2, \quad (18)$$

$$S_m = S_{m,0} \cdot pH^{b1} \cdot T^{b2}, \quad (19)$$

где  $k_{p,T}, k_{p,v,D}, b1, b2$  – эмпирические коэффициенты. По результатам сравнения расчета концентраций в вытяжках из донных отложений по уравнению (11)

при расчетных значениях  $k_p, b1$  и варианте, когда  $k_p=b1=0$ , можно предположить, что pH определяет для меди и общего содержания растворенных солей по удельной электропроводности 71–72 % массы сорбированного вещества в донных отложениях, а для свинца – более 90 %.

Сопоставление результатов расчета геохимических и гидравлических характеристик также показало, что сорбционная емкость  $S_m$  в целом возрастает с

увеличением не только pH, но и коэффициента шероховатости  $n_r$  (20), (21), причем нами отмечены примерно одинаковые тенденции возрастания значений pH и  $n_r$  по мере приближения к морскому краю дельты (рис. 5), а в работе [An assessment... 2008] – обратная зависимость значений pH и содержания растворенного алюминия (можно предположить, что при этом возрастает содержание Al в коллоидной и взвешенной форме, что согласуется с увеличением содержания взвешенных наносов и общим увеличением значений  $n_r$ ):

$$S_m(\text{Cu}) = 43,945 \cdot n_r^{0,089}; NS = 0,53, \quad (20)$$

$$S_m(\text{Pb}) = 20,606 \cdot n_r^{0,513}; NS = 0,76. \quad (21)$$

Указанные факты свидетельствуют о преобладании процессов осаждения и соосаждения (с сорбцией компонентов на осаждающихся частицах глини-

стых минералов и некоторых малорастворимых органометаллических соединений), что в целом соответствует результатам термодинамических расчетов, выполненных по результатам полевых и лабораторных работ на рукаве Хамлуонг в январе 2014 г., и хорошо согласуется с концепцией маргинального фильтра [Лисицын, 1994]. В частности, в работе [Савичев, Фунг, 2014] было показано, что поверхностные воды в дельте Меконга в целом недонасыщены относительно первичных алюмосиликатов и незначительно пересыщены относительно кварца и соединений кальция и магния с гуминовыми кислотами, причем по мере приближения к морю отмечается уменьшение их недонасыщенности относительно карбонатных минералов (или даже незначительное пересыщение).

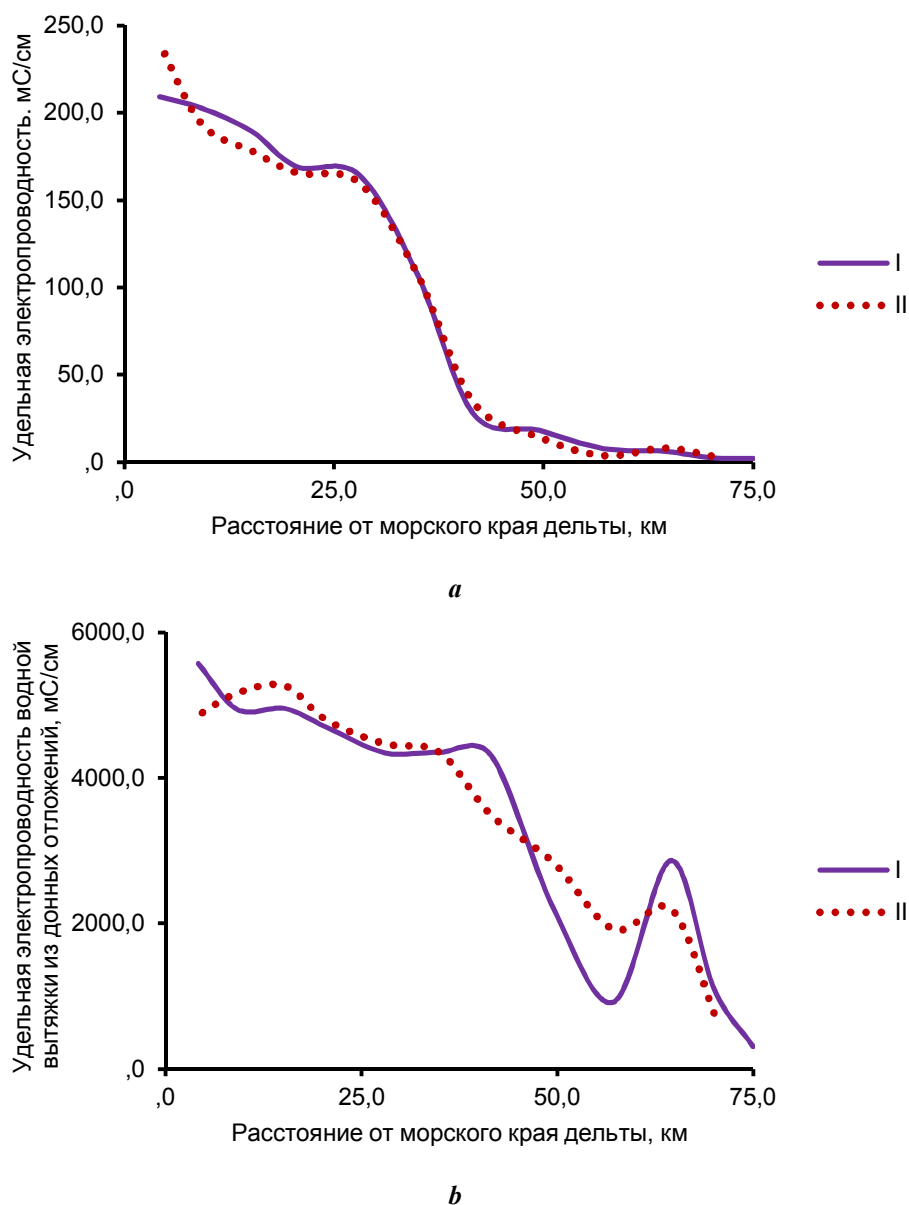


Рис. 2. Изменение измеренных (I) и вычисленных (II) значений удельной электропроводности поверхностных вод (a) и водной вытяжки из донных отложений (b) по длине рукава Хамлуонг

Fig. 2. Change of measured (I) and calculated (II) values of specific electric conductivity of surfaces waters (a) and a water extract from channel sediments (b) on length of the Ham Luong channel

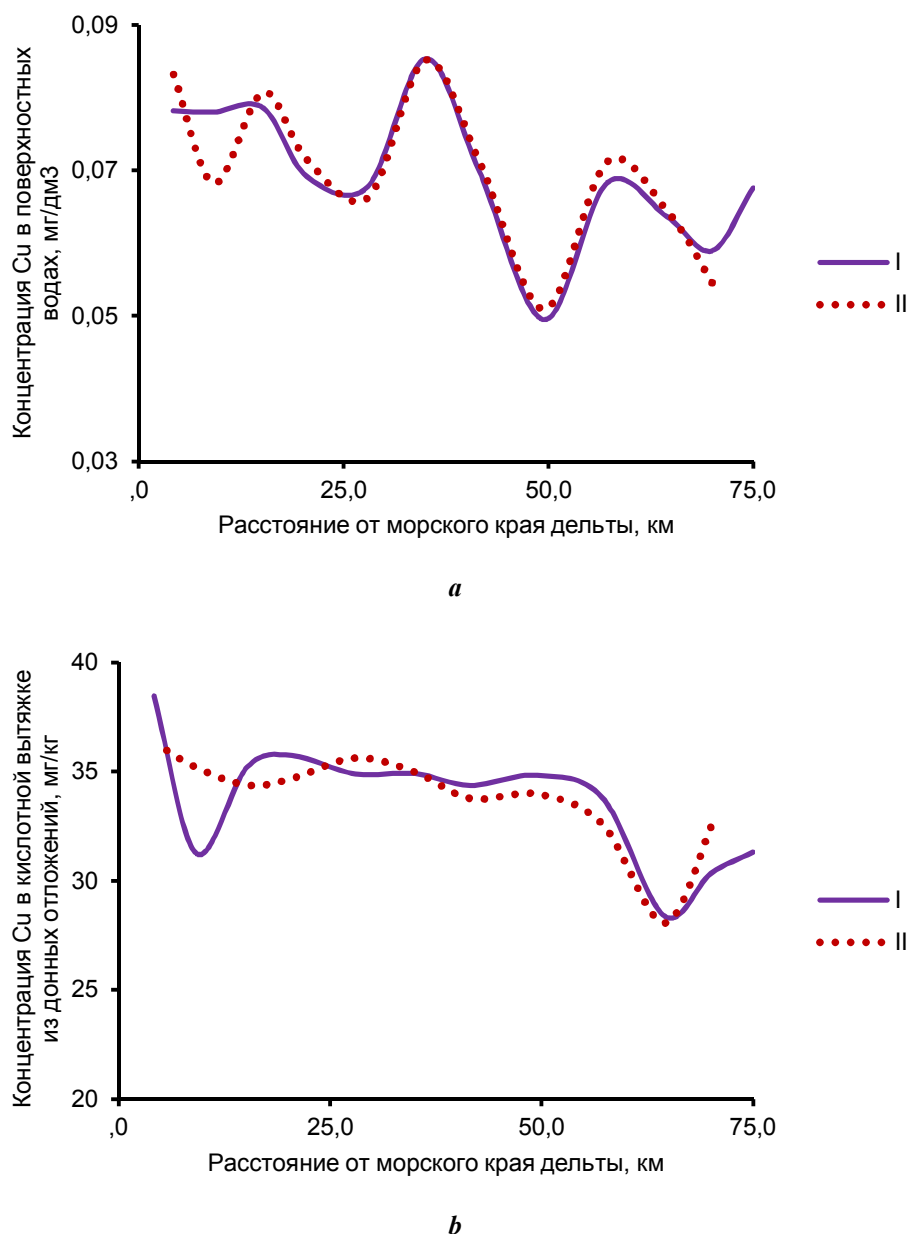


Рис. 3. Изменение измеренных (I) и вычисленных (II) концентраций Cu в поверхностных водах (a) и водной вытяжке из донных отложений (b) по длине рукава Хамлуонг

Fig. 3. Change of measured (I) and calculated (II) values of Cu-concentration in surfaces waters (a) and a water extract from channel sediments (b) on length of the Ham Luong channel

Уменьшение скоростей течения потока у морского края дельты приводит к снижению его транспортирующей способности и отложению наносов [Vu et al., 2016], сопровождающемуся увеличением сорбционной емкости донных отложений, времени взаимодействия частиц наносов и донных отложений с водой (время осаждения частиц в целом возрастает с уменьшением их размера и гидравлической крупности) и сорбции компонентов раствора, особенно тех, которые находятся в равновесии с минералами наносов и донных отложений или в состоянии пересыщения. При этом следует отметить, что достаточно

резкое увеличение удельной электропроводности водной вытяжки из донных отложений на участке около 40–50 км от морского края дельты (рис. 2, b) сопровождается появлением обратной зависимости между удельной электропроводностью и модулем средней по вертикали пульсационной скорости  $w$  (рис. 6), вычисленной, согласно [Караушев, 1969], по формуле (22):

$$w = \frac{v}{\sqrt{N_{ш}}}, \quad (22)$$

где  $v$  – средняя скорость течения; величина  $N_{ш}$  определяется по формуле (13).

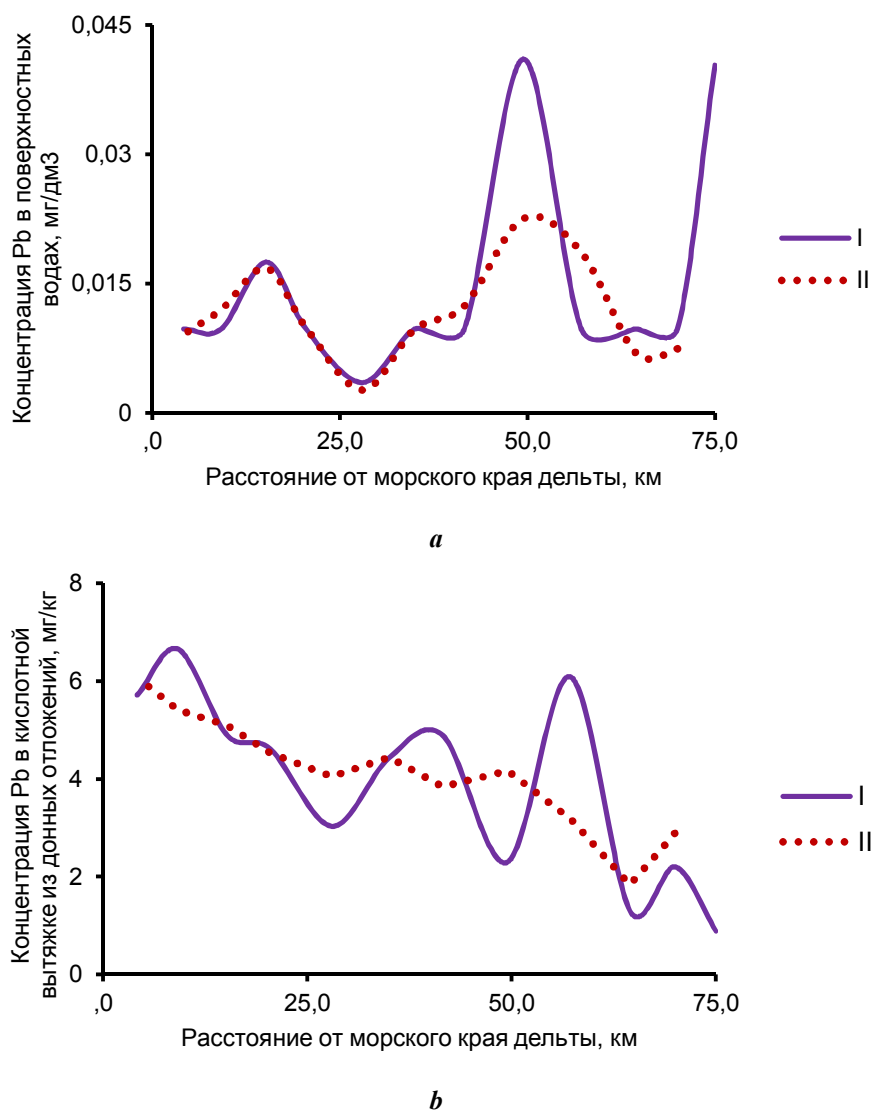


Рис. 4. Изменение измеренных (I) и вычисленных (II) концентраций Pb в поверхностных водах (a) и водной вытяжке из донных отложений (b) по длине рукава Хамлуонг

Fig. 4. Change of measured (I) and calculated (II) values of Pb-concentration in surfaces waters (a) and a water extract from channel sediments (b) on length of the Ham Luong channel

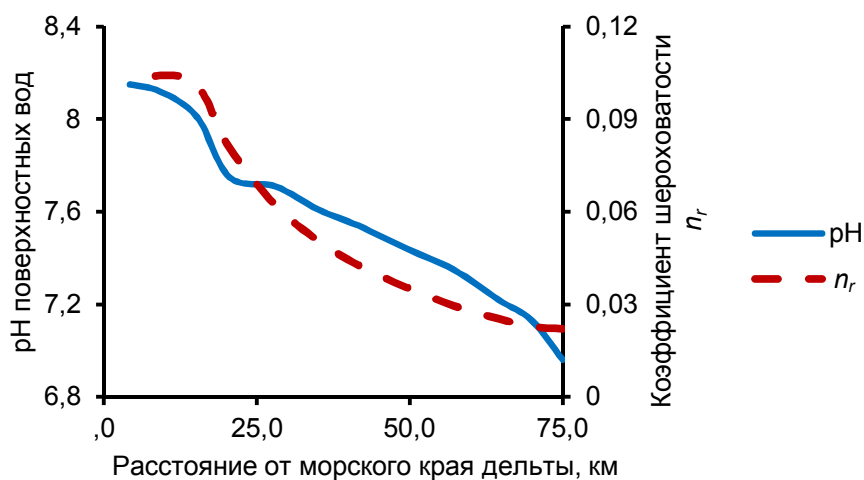
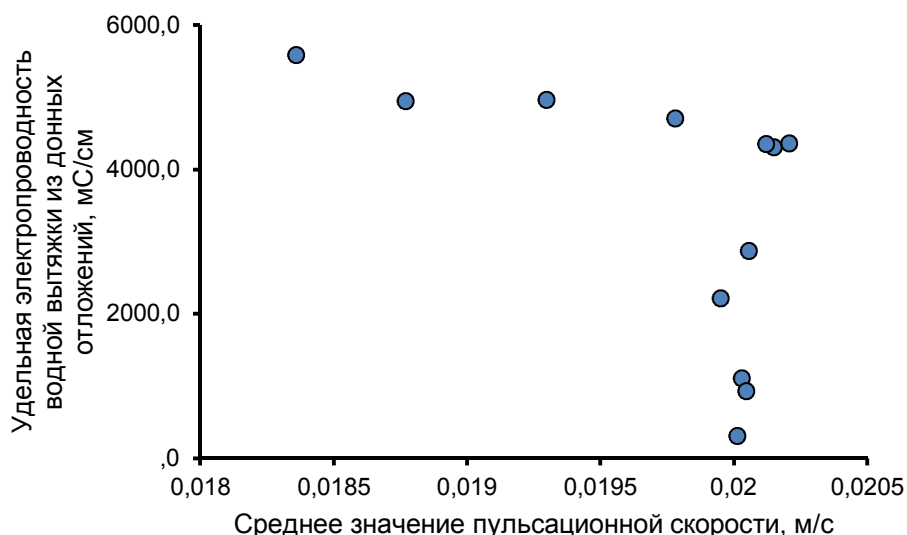


Рис. 5. Изменение значений pH и коэффициента шероховатости по длине рукава Хамлуонг

Fig. 5. Change of values pH and roughness factor on length of the Ham Luong channel



**Рис. 6. Соотношение значений средней пульсационной скорости по вертикали  $w$  (22) и удельной электропроводности водной вытяжки из донных отложений рукава Хамлуонг**

**Fig. 6. Ratio of values of average velocity of pulsations (on a vertical)  $w$  (22) and specific electric conductivity of a water extract from sediments of the Ham Luong channel**

### Закключение

В результате выполненного исследования разработана методика моделирования изменений удельной электропроводности и содержаний Cu и Pb в поверхностных водах и вытяжках из донных отложений в устьевой области Меконга, позволяющая получить достаточно точное соответствие измерениям, выполненным Фунг Тхай Зыонгом [Фунг, 2015; Фунг, Савичев, Нгуен, 2015].

На основе этой методики и в рамках концепции маргинального фильтра [Лисицын, 1994] обоснована выявленная в [Фунг, 2015; Фунг, Савичев, Нгуен, 2015] зависимость концентраций ряда микроэлементов в вытяжках из донных отложений в дельте Меконга от величины pH поверхностных вод – важного фактора направленности процессов растворения,

осаждения и соосаждения малорастворимых веществ в зоне смешения морских и речных вод, а также формирования сорбционной емкости донных отложений.

Параметры уравнений (9)–(11) могут быть в дальнейшем уточнены (особенно для Cu и Pb), но в целом рассмотренная модель может быть использована не только для объяснения наблюдаемых изменений химического состава поверхностных вод и донных отложений в устьевых областях рек, но и для планирования мероприятий по управлению качеством компонентов окружающей среды, например путем изъятия донных отложений, замены грунтов с другим гранулометрическим, минеральным и химическим составом, изменения скоростного режима и т.д.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-05-00042, 18-55-80015.*

### ЛИТЕРАТУРА

- Бэфани Н.Ф., Калинин Г.П. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. Л. : Гидрометеиздат, 1983. 390 с.
- Гордеев В.В. Система река – море и ее роль в геохимии океана : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. М. : Институт океанологии РАН, 2009. 35 с.
- Караушев А.В. Речная гидравлика. Л. : Гидрометеиздат, 1969. 416 с.
- Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические и экологические аспекты. М. : Наука, 2004. 677 с.
- Лазарева Е.В., Парфенова А.М., Демина Т.С., Романова Н.Д., Беляев Н.А., Романкевич Е.А. Перенос коллоидной компоненты речного стока через эстуарии // Океанология. 2017. Т. 57, № 4. С. 575–586.
- Лехов А.В. Физико-химическая гидрогеодинамика. М. : КДУ, 2010. 500 с.
- Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34, № 5. С. 735–747.
- Мелиорация и водное хозяйство : в 5 т. Т. 5: Водное хозяйство / под ред. И.И. Бородавченко. М. : Агропромиздат, 1988. 399 с.
- Михайлов В.Н., Аракляниц А.Д. Особенности гидрологических и морфологических процессов в устьевой области р. Меконг // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 3. С. 259–273.



**Михайлов В.Н., Повалишников Е.С., Исупова М.В., Михайлова М.В.** Дельты как индикаторы крупномасштабных изменений природных условий в речных бассейнах и приемных вод // Проблемы гидрологии и гидроэкологии. М. : МГУ, 1999. Вып. 1. С. 217–237.

**Океанология.** Химия океана / под ред. О.К. Бордовского, В.Н. Иваненкова. М. : Наука, 1979. Т. 1. 518 с.

**Савченко А.В., Грамм-Осипов Л.М., Марьяш А.А.** Физико-химическое моделирование поведения микроэлементов (As, V, Co, Hg) при смешении речной и морской вод (система рек Раздольная – Амурский залив) // Океанология. 2009. Т. 49, № 1. С. 45–52.

**Савенко А.В., Покровский О.С., Кожин М.Н.** Трансформация стока растворенных веществ в устьевых областях малых водотоков южного побережья Кольского полуострова // Океанология. 2011. Т. 51, № 5. С. 837–848.

**Савенко В.С.** Геохимические проблемы глобального гидрологического цикла // Проблемы гидрологии и гидроэкологии. М.: МГУ, 1999. Вып. 1. С. 48–72.

**Савичев О.Г., Фунг Т.З.** Эколого-геохимическое состояние поверхностных вод и донных отложений в дельте Меконга (Вьетнам) // Вестник Томского государственного университета. 2014. № 388. С. 246–252.

**Справочник** по гидрохимии / под ред. А.М. Никанорова. Л. : Гидрометеиздат, 1989. 391 с.

**Тон Т.Х.** Экологический мониторинг в провинции Бен Тре. Бен Тре : Департамент науки и технологии, 2013. 139 с. (на вьетнам. яз.).

**Фунг Т.З.** Эколого-геохимическое состояние дельты реки Меконг (республика Вьетнам) по результатам изучения донных отложений : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск : Томск. политехн. ун-т, 2015. 25 с.

**Фунг Т.З., Савичев О.Г., Нгуен К.Х.** Микроэлементный состав донных отложений в дельте реки Меконг (Республика Вьетнам) // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 5. С. 536–543.

**Хоанг В.Х.** Формирование химического состава подземных вод дельты реки Меконг (СРВ) и перспективы их использования в народном хозяйстве : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М. : МГРИ, 1990. 18 с.

**An Assessment of water quality in the Mekong Basin.** Technical Paper No. 19. Vientian: Mekong river commission. 2008. 70 p.

**Benedini M., Tsakiris G.** Water Quality Modelling for Rivers and Streams. Dordrecht : Springer, 2013. 288 p.

**Chen W., Liu Q., Huh C.-A., Dai M., Miao Y.-Ch.** Signature of the Mekong River plume in the western South China Sea revealed by radium isotopes // Journal of Geophysical Research. 2010. V. 115. P. 1–12. DOI:10.1029/2010JC006460.

**Hart B.T., Jones M.J., Pistone G.** Transboundary Water Quality Issues in the Mekong River Basin // Mekong River Commission. Water Studies Centre, Monash University, Australia, 2001. 77 p.

**Hoa L.T.V., Nhan N.H., Wolanski E., Cong T.T., Shigeko H.** The combined impact on the flooding in Vietnam's Mekong River delta of local man-made structures, sea level rise, and dams upstream in the river catchment // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2007. № 71. P. 110–116.

**Jakob A.** Modelling Solute Transport Using the Double Porous Medium Approach // Modelling in aquatic chemistry. Paris, France : Organisation for economic co-operation and development (OECD). Nuclear Energy Agency, 1997. P. 525–576.

**Lasaga A.C.** Fundamental approaches in describing mineral dissolution and precipitation rates // Reviews in Mineralogy. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals // Mineralogical Society of America. 1995. V. 31. P. 23–86.

**Loucks D.P., Van Beek E.** Water Resources Systems Planning and Management. An introduction to Methods, Models and applications. Turin : UNESCO, 2005. 680 p.

**Nash J.E., Sutcliffe J.V.** River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles // Journal of Hydrology. 1970. № 10 (3). P. 282–290.

**Nguyen A.D., Savenije H.H.** Salt intrusion in multi-channel estuaries: a case study in the Mekong Delta, Vietnam // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2006. V. 10, P. 743–754. DOI: 10.5194/hess-10-743-2006.

**Robinson B., Bolan N., Mahimairaja S., Clothier B.** Solubility, Mobility, and Bioaccumulation of trace Elements; abiotic Processes in the Rhizosphere // Trace elements in the Environment. Biogeochemistry, Biotechnology, and Bioremediation / ed. by M.N.V. Prasad, K.S. Sajwan, R. Naidu. USA. N.Y. : Taylor&Francis, 2006. P. 97–110.

**The Mekong River Commission** (<http://archive.iwlearn.net/mrcmekong.org>) (дата обращения: 15.03.2018).

**Vu D.V., Sylain O., Nguyen V.T., Nguyen N.T.** Numerical Simulation of Suspended sediment Dynamic Due to Seasonal Forcing in the Mekong Coastal Area // Water. 2016. V. 2655, № 8. DOI 10.3390/w8060255.

**White Ar.F.** Chemical weathering rates of silicate minerals in soils // Reviews in Mineralogy. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals / Mineralogical Society of America. 1995. V. 31. P. 405–462.

#### Авторы:

**Савичев Олег Геннадьевич**, профессор, доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия. E-mail: OSavichev@mail.ru

**Гусева Наталья Владимировна**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, руководитель отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия. E-mail: guseva24@yandex.ru

*Geosphere Research*, 2018, 2, 72–82. DOI: 10.17223/25421379/7/5

**O.G. Savichev, N.V. Guseva**

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

#### INTERRELATIONS BETWEEN THE CHEMICAL COMPOSITION OF SEDIMENTS AND SURFACE WATERS IN MOUTH AREAS OF THE MEKONG RIVER (VIET NAM)

The technique of modelling of changes of specific electric conductivity and contents of copper and lead in surface waters and extracts from bottom sediments in a mouth of the Mekong river is developed, allowing to receive exact enough conformity to measure-

ments. Measurements of physical–chemical and geochemical parameters are executed by Phung Thai Duong in January, 2013 in the Ham Luong channel (one of large channels of delta of the Mekong river). On the basis of this technique and within the framework of the concept of marginal filter dependence of concentration of some microelements in extracts from bottom sediments in delta of the Mekong river from pH-value of surface waters – the important factor of an orientation of processes of dissolution, sedimentation and co-sedimentation of substances with small solubility in a zone of mixture of sea and river waters, and also formations of sorption capacity of bottom sediments is proved revealed earlier by Phung Thai Duong and co-authors.

The model of change of concentration of substances in surface waters and ground adjournment in a zone of mixture of sea and river waters represents the simplified analytical decision of the one-dimensional stationary equation of advective and diffusion flow. Author's interpretation of function of receipt of substances in bottom sediments and surface waters is offered. Approbation of model is carried out for specific electric conductivity, concentration of copper and lead. Parameters of model can be specified in further (especially for Cu and Pb). But as a whole the considered model can be used not only for an explanation of observable changes of a chemical compound of surface waters and bottom sediments in a rivers mouth, but also for planning actions on quality management of components of an environment, for example, by withdrawal of bottom sediments, replacement of sediments with other size of particles, another mineral and a chemical composition, changes of a high-speed mode and so on.

**Keywords:** delta of the Mekong river, mixture of sea and river waters, a chemical composition.

## References

- Befani N.F., Kalinin G.P. *Uprazhneniya i metodicheskiye razrabotki po gidrologicheskim prognozam* [Exercises and methodological work on hydrological forecasts]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. 390 p. In Russian.
- Gordeyev V.V. *Sistema reka - more i yeye rol' v geokhimii okeana* [The river-sea system and its role in the geochemistry of the ocean]. Avtoref. dis. na soisk. uch. step. d.g.-m.n. Moscow : Institut okeanologii RAN, 2009. 35 p. In Russian.
- Karaushev A.V. *Rechnaya gidravlika* [River Hydraulics] Leningrad: Gidrometeoizdat, 1969. 416 p. In Russian.
- Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskiye i ekologicheskiye aspekty* [Geochemistry of groundwater. Theoretical and ecological aspects] Moscow : Nauka. 2004, 677 p. In Russian.
- Lazareva Ye.V., Parfenova A.M., Demina T.S., Romanova N.D., Belyayev N.A., Romankevich Ye.A. Transport of the colloid matter of riverine runoff through estuaries // *Oceanology*. 2017. T. 57. № 4. pp. 520–529.
- Lekhov A.V. *Fiziko-khimicheskaya gidrogeodinamika* [Physicochemical hydrogeodynamics] Moscow: KDU, 2010. 500 p. In Russian.
- Lisitsyn A.P. *Marginal'nyy fil'tr okeanov* [Marginal filter of the oceans] // *Okeanologiya*. 1994. T. 34. № 5. pp. 735–747. In Russian.
- Melioratsiya i vodnoye khozyaystvo* [Melioration and water management]. In 5 vol. V. 5. *Vodnoye khozyaystvo* [Water management] / Ed. by I.I. Borodavchenko. Moscow : Agropromizdat. 1988. 399 p. In Russian.
- Mikhailov V.N., Arakelyants A.D. Specific features of hydrological and morphological processes in the mouth area of the Mekong river // *Water Resources*. 2010. T. 37. № 3. pp. 253–267.
- Mikhaylov V.N., Povalishnikova Ye.S., Isupova M.V., Mikhaylova M.V. *Del'ty kak pokazateli krupnomasshtabnykh izmeneniy v rechnykh basseynakh i priyemnykh vodnykh* [Delta as indicators of large-scale changes in natural conditions in river basins and in the reception waters] // *Problemy gidrologii i gidroekologii*. Vyp. 1. Moscow : MGU, 1999. pp. 217–237. In Russian.
- Okeanologiya. Khimiya okeana* [Oceanology. Chemistry of the ocean] T. 1 / Ed. by O.K. Bordovskogo, V.N. Ivanenkova. Moscow : Nauka, 1979. 518 p. In Russian.
- Savchenko A.V., Gramm-Osipov L.M., Mar'yash A.A. physicochemical modeling of the behavior of microelements (As, V, Cr, Co, and Hg) under the mixing of riverine and marine waters (the Razdol'naya river-Amur bay system) // *Oceanology*. 2009. T. 49, № 1, pp. 39–46.
- Savenko A.V., Pokrovsky O.S., Kozhin M.N. Transformation of the dissolved components runoff in the mouth areas of small watersheds of the southern coast of the Kola peninsula // *Oceanology*. 2011. T. 51. № 5. pp. 785–795.
- Savenko V.S. *Geokhimicheskiye problemy global'nogo gidrologicheskogo tsikla* [Geochemical problems of the global hydrological cycle] / *Problemy gidrologii i gidroekologii*. Vyp. 1. Moscow : MGU. pp. 48–72. In Russian.
- Savichev O.G., Phung Thai D. The ecogeochemical condition of surface waters and bed sediments in the delta of the Mekong River (Vietnam) // *Tomsk State University Journal*. 2014. № 388. pp. 246–252. In Russian
- Spravochnik po gidrokhimii* [Handbook of hydrochemistry] / Ed. A.M. Nikanorova. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1989. 391 p. In Russian
- Tong T.Kh. Ecological monitoring in the province of Ben Tre. Ben Tre: Department of Science and Technology. 2013. 139 p. In Vietnamese
- Phung Thai D. *Ekologo-geokhimicheskoye sostoyaniye del'ty reki Mekong (respublika V'yetnam) po rezul'tatam izucheniya donnykh otlozheniy* [Ecological and geochemical status of the Mekong Delta (Republic of Vietnam) based on the study of bottom sediments]. Avtoref. dis. na soisk. uch. step. k.g.-m.n. Tomsk: Tomsk. politekhn. un-t. 2015. 25 p. In Russian
- Phung Thai D., Savichev O.G., Khyong N.K. Microelement composition of bottom sediments in Mekong river delta, Republic of Vietnam // *Water Resources*. 2015. T. 42. № 5. pp. 683–689.
- Khoang V.KH. *Formirovaniye khimicheskogo sostava podzemnykh vod del'ty reki Mekong (SRV) i perspektivy ikh ispol'zovaniya v narodnom khozyaystve* [Formation of the chemical composition of groundwater in the Mekong Delta (SRV) and the prospects for their use in the national economy]. Avtoref. dis. na soisk. uch. step. k.g.-m.n. Spetsial'nost' 01.00.00 – gidrogeologiya. Moscow : MGRI, 18 p.
- An Assessment of water quality in the Mekong Basin. Technical Paper No. 19. Vientian: Mekong river commission. 2008. 70 p.
- Benedini M., Tsakiris G. *Water Quality Modelling for Rivers and Streams*. Dordrecht: Springer, 2013. 288 p.
- Chen W., Liu Q., Huh C.-A., Dai M., Miao Y.-Ch. Signature of the Mekong River plume in the western South China Sea revealed by radium isotopes // *Journal of geophysical research*. 2010. V. 115. pp. 1–12. DOI:10.1029/2010JC006460.
- Hart B.T., Jones M.J., Pistone G. Transboundary Water Quality Issues in the Mekong River Basin // Mekong River Comission. Water Studies Centre, Monash University, Australia, 2001. 77 p.
- Hoa L.T.V., Nhan N.H., Wolanski E., Cong T.T., Shigeko H. The combined impact on the flooding in Vietnam's Mekong River delta of local man-made structures, sea level rise, and dams upstream in the river catchment // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2007. No 71, pp. 110–116.

- Jakob A. Modelling Solute Transport Using the Double Porous Medium Approach // Modelling in aquatic chemistry. Paris, France: Organisation for economic co-operation and development (OECD). Nuclear Energy Agency, 1997, pp. 525–576.
- Lasaga A.C. Fundamental approaches in describing mineral dissolution and precipitation rates // Reviews in Mineralogy. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals / Mineralogical Society of America. 1995. V. 31. pp. 23–86.
- Loucks D.P., Van Beek E. Water Resources Systems Planning and Management. An introduction to Methods, Models and applications. Turin : UNESCO, 2005. 680 p.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principles // Journal of Hydrology. 1970. № 10 (3). pp. 282–290.
- Nguyen A.D., Savenije H.H. Salt intrusion in multi-channel estuaries: a case study in the Mekong Delta, Vietnam // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2006. V. 10, pp. 743–754. DOI: 10.5194/hess-10-743-2006.
- Robinson B., Bolan N., Mahimairaja S., Clothier B. Solubility, Mobility, and Bioaccumulation of trace Elements; abiotic Processes in the Rhizosphere // Trace elements in the Environment. Biogeochemistry, Biotechnology, and Bioremediation / edited by M.N.V. Prasad, K.S. Sajwan, R. Naidu. USA. New York: Taylor&Francis. 2006. pp. 97–110.
- The Mekong River Commission (<http://archive.iwlearn.net/mrcmekong.org> (дата обращения 15.03.2018)).
- Vu D.V., Sylain O., Nguyen V.T., Nguyen N.T. Numerical Simulation of Suspended sediment Dynamic Due to Seasonal Forcing in the Mekong Coastal Area // water. 2016. Vol. 2655. N 8. DOI 10.3390/w8060255.
- White Ar.F. Chemical weathering rates of silicate minerals in soils // Reviews in Mineralogy. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals / Mineralogical Society of America. 1995. V. 31. pp. 405–462.

**Authors:**

**Savichev Oleg G.**, Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Department of Hydrogeology, Engineering Geology and Hydrogeocology, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia. E-mail: OSavichev@mail.ru

**Guseva Natalia V.**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Head of Division for Geology, School of Earth Sciences & Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia. E-mail: guseva24@yandex.ru