

На правах рукописи



Фунг Тхай Зыонг

**ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ
ДЕЛЬТЫ РЕКИ МЕКОНГ (РЕСПУБЛИКА ВЬЕТНАМ)
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗУЧЕНИЯ
ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ**

Специальность 25.00.36 – Геоэкология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Томск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

доктор географических наук, профессор

Савичев Олег Геннадьевич

Официальные оппоненты:

Страховенко Вера Дмитриевна

доктор геолого-минералогических наук, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск), ведущий научный сотрудник

Масленникова Анна Валерьевна

кандидат геолого-минералогических наук Институт минералогии Уральского отделения РАН (г. Миасс), научный сотрудник

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (г. Томск)

Защита состоится 21 мая 2015 г. в 17 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.269.07 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30 (корпус 20, ауд. 504).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск, ул. Белинского, 55) и на сайте: <http://portal.tpu.council/914/worklist>

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, к. г.-м. н., доцент



Л.В. Жорняк

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Река Меконг является одной из крупнейших рек в мире. Она играет исключительно важную роль в социально-экономическом развитии всей Юго-Восточной Азии. Площадь водосбора этой реки составляет 795000 км², а в его пределах выделяют участки верхнего и нижнего течения. Только в нижнем течении реки Меконг на площади 606000 км² проживает около 53 млн человек. Особенно заметно влияние этой реки на жизнь людей на участке её нижнего течения в пределах Вьетнама, где протоки и рукава Меконга – одновременно и важнейшая транспортная артерия, и источник водоснабжения, и приёмник сточных вод промышленных, сельскохозяйственных и коммунально-бытовых предприятий. В дельте Меконга в пределах Вьетнама решение социально-экономических проблем осложняется влиянием морских вод на водные и наземные экосистемы [Hoa et al., 2007; Overview..., 2005; The planning Atlas..., 2011].

Полноценная оценка эколого-геохимического состояния такого водного объекта должна включать исследование как поверхностных и подземных вод, так и донных отложений. Химический состав последних является важным показателем геоэкологического и геохимического состояния водных объектов и их водосборов, а соответствующие данные – необходимым информационным ресурсом при планировании и реализации природоохранных программ и мероприятий по комплексному использованию территорий, в том числе в сельскохозяйственных целях.

Необходимо отметить, что по водохозяйственному планированию и гидрохимии реки Меконг, особенно на участке её среднего течения, имеются значительные материалы, обобщённые в работах [Diagnostic..., 2007; An assessment of..., 2008; The Mekong..., 2010]. Имеется ряд работ и по геохимии и геоэкологии донных отложений рек региона, но в значительно меньшем объёме, недостаточном для объективного принятия управленческих решений по использованию и охране водных объектов в нижнем течении реки.

Всё это и обусловило **цель исследования**: исследование современного эколого-геохимического состояния дельты реки Меконг в пределах республики Вьетнам по результатам изучения донных отложений для управления водными и земельными ресурсами региона.

Для достижения цели были поставлены рассмотрены следующие **задачи**: 1) выявление основных особенностей химического состава и оценка качества донных отложений и поверхностных вод, формирующихся в дельте Меконга при смешении морских и речных вод; 2) выявление закономерностей изменения и условий формирования химического состава донных отложений рукавов и протоков в дельте Меконга; 3) разработка рекомендаций по использованию донных отложений в отраслях экономики.

Объект и методы исследования. Объектом исследования являются донные отложения и воды в дельте реки Меконга. В процессе исследования использовались ландшафтно-геохимический, географо-гидрологический, статистический методы, методы химического анализа вод и донных отложений.

Исходные материалы. Используются данные собственных исследований, выполненных совместно с сотрудниками университета Донгтхап (Вьетнам) и Томского политехнического университета в 2013–2015 гг., материалы, полученные в рамках деятельности международной комиссии по бассейну реки Меконг, и опубликованные данные исследователей из Вьетнама, Великобритании, России и ряда других стран.

Научная новизна. Впервые выявлены закономерности изменения микроэлементного состава донных отложений в дельте Меконга в пределах Вьетнама, получена его общая характеристика и выполнена оценка вклада различных факторов в формирование содержания ряда токсичных микроэлементов. Установлено, что для Zn, Cd, Cu, Pb таким фактором является аккумуляция частиц наносов, в состав которых входят перечисленные элементы. Для As и Hg заметную роль также играют процессы сорбции микроэлементов на оседающих частицах и выведения из

водной среды малорастворимых соединений (суммарное влияние этих факторов для As – 27 %, для Hg – 31 %). Разработана методика оценки вклада различных факторов в формирование микроэлементного состава донных отложений в дельте больших рек, основанная на расчёте русловых деформаций. Предложен и обоснован способ экспресс-прогноза содержания микроэлементов в донных отложениях дельты Меконга по величине рН поверхностных вод.

Достоверность результатов работы. Достоверность результатов исследования определяется: 1) использованием аттестованных методов химического анализа и выполнением определений в аккредитованных лабораториях университета Донгтхап (Вьетнам) и Томского политехнического университета (Российская Федерация); 2) использованием статистического и экспертного анализа данных наблюдений с учётом нормативных требований, принятых во Вьетнаме и Российской Федерации; 3) апробацией результатов исследования в процессе публикаций в рецензируемых научных журналах и докладов на научных конференциях.

Практическая значимость работы. Результаты исследования являются научной основой для: 1) планирования использования, воспроизводства и охраны земельных и водных ресурсов в дельте Меконга; 2) оптимизации сети государственного мониторинга водных объектов и геологической среды в бассейне реки Меконг; 3) прогнозов изменения состояния окружающей среды в дельте Меконга; 4) планирования мероприятий по развитию сельского и коммунального хозяйства на юге Социалистической республики Вьетнам; 5) разработки учебных курсов и проведении учебных занятий по геоэкологии, гидрохимии, геохимии, природообустройству в университетах Социалистической республики Вьетнам и Российской Федерации.

Апробация работы. Основные положения диссертации: 1) опубликованы в статьях в рецензируемых научных журналах, в том числе в трёх статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ; 2) докладывались и обсуждались на конференциях: Всероссийская

конференция «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов» (г. Томск, апрель, 2013); XVII Международный симпозиум (г. Томск, апрель, 2013); «Науки о земле: современное состояние» (г. Новосибирск, август, 2013); V межвузовская конференция (г. Москва, октябрь, 2013); конференция «Геология и полезные ископаемые четвертичных отложений» (Беларусь, апрель, 2014).

Личный вклад автора. Автором лично сформулированы защищаемые положения на основе анализа данных, значительная часть которых получена лично в 2013–2014 гг. В том числе, под руководством и при непосредственном участии автора были отобраны 23 пробы донных отложений и 23 пробы поверхностных вод в рукавах и протоках дельты Меконга и лично проведено определение микроэлементного состава в университете Донгтхап, проведены обобщение и анализ геохимических данных, на основе которых выявлены основные особенности химического состава донных отложений и вод в дельте Меконга и закономерностей его формирования в условиях значительной антропогенной нагрузки и смешения речных и морских вод.

Структура и объём диссертации. Диссертация объёмом в 101 страницу машинописного текста состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 131 наименования, содержит 41 рисунок и 23 таблицы.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность научному руководителю, д.г.н., проф. Савичеву О.Г. Автор искренне благодарен за ценные замечания по содержанию работы и её апробации, помощь при выполнении химических анализов проф., д.г.-м.н. Попову В.К., проф. д.г.-м.н. Рихванову Л.П., проф., д.г.-м.н. Шварцеву С.Л., к.г.-м.н. Хващевской А.А., к.г.-м.н. Гусевой Н.В., Полтановой Л.М. и всему коллективу кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии и кафедры геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета, своим друзьям и коллегам в университете Донгтхап, Департаменте науки и технологии провинции Бенче и Южном гидротехническом институте Вьетнама.

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Первое защищаемое положение

Эколого-геохимическое состояние донных отложений в дельте Меконга определяется совместным действием антропогенных и природных факторов и оценивается в целом как неудовлетворительное по содержанию Mn, Zn, Cu, Pb и As, увеличивающемуся по мере приближения к морю при смешении речных и морских вод и снижении средних скоростей течения, определяющих общие условия накопления наносов и концентрирования в отложениях ряда веществ.

Дельта Меконга занимает территорию площадью 46700 км² [Михайлов, Аракельянц, 2010]. В соответствии с подходами, изложенными в [Михайлов, 1997], устьевое взморье Меконга характеризуется как открытое выдвинутое, а устьевой участок – как многорукавный с дельтой, сформированной преимущественно под влиянием приливов и волнения. Собственно дельта р. Меконг имеет сложное строение и представлена двумя комплексами рукавов – Тиензанг и Хаузанг. Первый из них (Хаузанг) включает три крупных рукава, а второй (Тиензанг) – шесть, среди которых наибольший по водности – рукав Хамлуонг. Именно этот рукав (Хамлуонг) и был основным объектом исследований, включавших отбор проб поверхностных вод и донных отложений на участке протяжённостью 77 км от устьевого взморья, в том числе: в январе 2013 г. – 12 проб; в январе 2014 г. – 3 пробы. Кроме того, в 2013 г. было отобрано 4 пробы донных отложений и поверхностных вод из проток рукава Хамлуонг (Сонг Бен Тре, Сонг Ба Три, Сонг Вам Нуок Тронг, Сонг Рач Сау) и 4 пробы – из других рукавов дельты р. Меконг – Кочьен и Кыадай (рис. 1).

Полевые работы выполнены Фунг Тхай Зыонгом при участии сотрудников университета Донгтхап (Вьетнам). Опробование поверхностных вод проводилось из слоя 0.3–0.4 м от поверхности, опробование донных отложений – из верхнего слоя около 0.2 м на расстоянии от берега: в рукавах – в 10–50 м; в протоках – в 5–10 м. Пробоподготовка включала: для донных

отложений – высушивание при температуре 25°C и измельчение до фракции с диаметром частиц до 0.5 мм; для поверхностных вод – фильтрацию через фильтр с диаметром пор 1.5 мкм. Лабораторные работы выполнялись в университете Донгтхап и Томском политехническом университете (ТПУ).

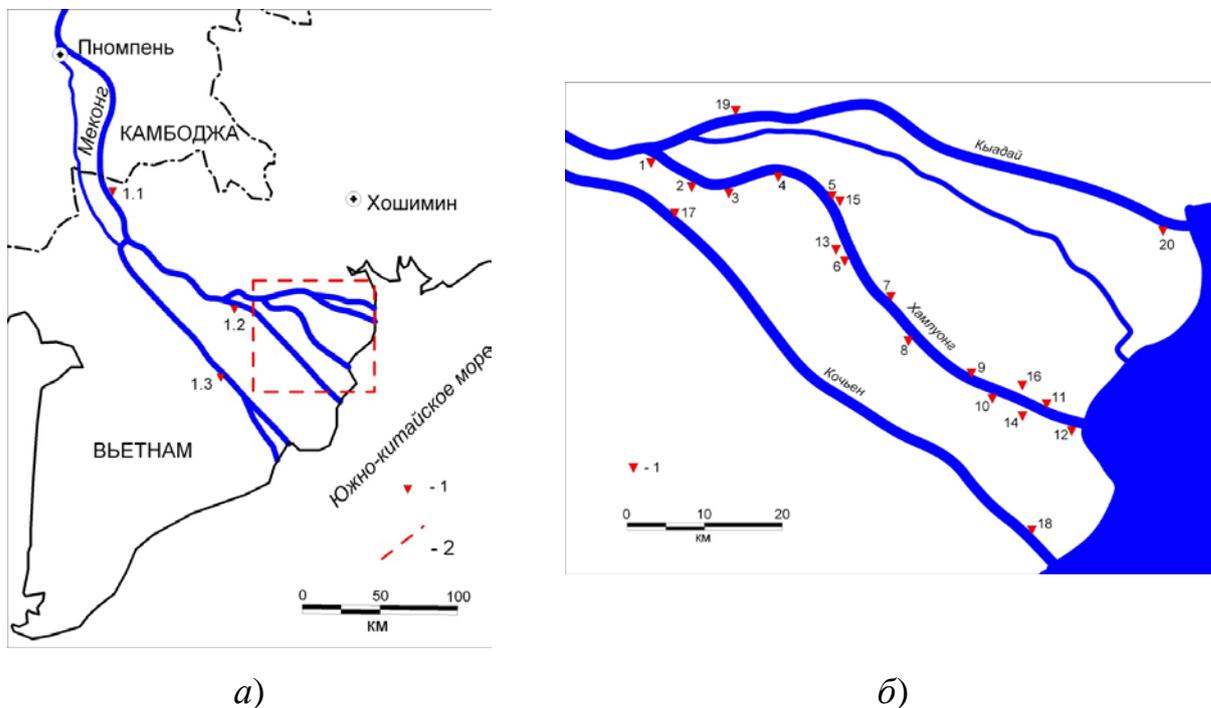


Рис. 1. Район исследования в нижнем течении р. Меконг:

а) пункты наблюдений в рамках программы “Mekong river commission”: 1.1 – Тан Чау; 1.2 – Ми Тхуан; 1.3 – Кан Тхо; 2 – участок полевых исследований, выполненных в январе 2013 и 2014 гг.; б) 1 – пункты отбора проб поверхностных вод и донных отложений в 2013 г. (1–20) и 2014 г. (1, 7, 11)

При определении гидрохимических и геохимических показателей использовались следующие методы: рН – потенциометрический; удельная электропроводность χ – кондуктометрический; SO_4^{2-} – турбидиметрический; Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , бихроматная окисляемость (БО), перманганатная окисляемость (ПО) – титриметрический; соединения азота, фосфаты, Si, Fe – фотометрический и ионная хроматография; Hg, As, Zn, Pb, Cu, Cd, Mn, Al, Na^+ , K^+ – атомно-абсорбционный, инверсионно-вольтамперометрический, пламенно-эмиссионная спектрометрия. В донных отложениях определение рН, удельной электропроводности, перманганатной окисляемости и содержаний макрокомпонентов проводилось в водной вытяжке, микроэлементов – в кислотной. При сопоставлении полученных результатов

с опубликованными материалами других авторов [Diagnostic..., 2007; Буй Т.Н., 2011; Доан В.Ф., 2012; Тон Т.Х., 2013 и др.] использовались данные по постам Тан Чау (Tan Chau), Ми Тхуан (My Thuan) и Кан Тхо (Can Tho).

Воды изученных рукавов и протоков на участке более 30 км от морского края дельты Меконга в соответствии с классификациями О.А. Алёкина относятся по минерализации к «пресным», по химическому составу – к гидрокарбонатным кальциевым (пост Тан Чау) и хлоридным кальциевым третьего типа (в 35 и 75 км от морского края дельты). По мере приближения к морю минерализация поверхностных вод увеличивается и на участке 4–10 км уже соответствует «солончатым» водам. При этом изменяется и химический состав вод за счёт увеличения вклада Cl^- и Na^+ (хлоридные натриевые воды второго типа). В целом, можно констатировать существенные изменения абсолютного и относительного содержания главных ионов в водах рукавов и протоков в дельте Меконга в зависимости от: 1) удалённости от её морского края; 2) приливов, оказывающих наиболее значительное влияние на участке около 40–50 км, слабое – до 60–65 км и более [Михайлов, 1997; Михайлов, Аракельянц, 2010]; 3) фазы водного режима. Наиболее резкие изменения приурочены к участку 35–42 км от морского края дельты (рис. 2).

По величине рН поверхностные воды обычно нейтральные и слабощелочные в пределах всей дельты (табл. 1), по жёсткости – от мягких в её верхней части до очень жёстких – в 4–10 км от морского края. Поверхностные воды содержат значительное количество соединений азота. Вследствие этого по классификации Водного агентства Франции, используемой для оценки качества речных вод в регионе [Diagnostic study..., 2007], уже по концентрациям NO_3^- и NH_4^+ воды изученных рукавов и протоков относятся к классу «очень плохие» («very bad») примерно в 17 % случаев и к классу «плохие» («bad») – в 31 % (при оценке качества использовалось 42 пробы, в которых определялись значения рН и удельной

электропроводности, концентрации NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , химическое потребление кислорода по бихроматной окисляемости).

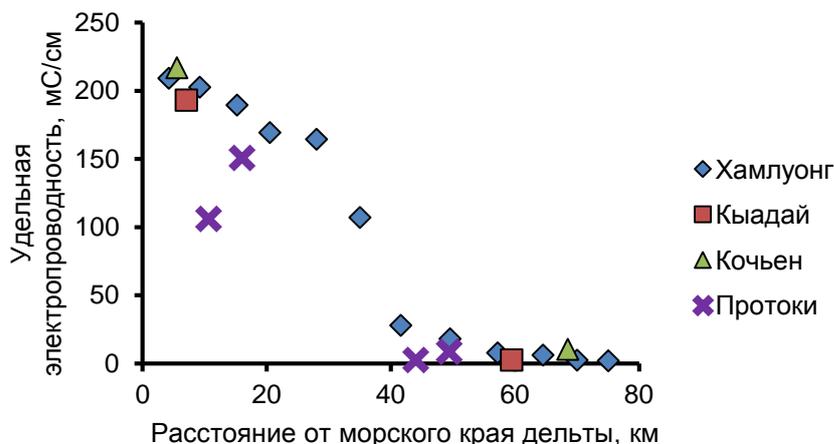


Рис. 2. Изменение удельной электропроводности вод в рукавах Хамлуонг, Кыадай, Кочьен и протоках дельты Меконга в январе 2013 г.

Сопоставление с нормами качества воды, установленными во Вьетнаме (QCVN 38:2011/BTNMT), показало, что состояние поверхностных вод оцениваются как удовлетворительное по содержанию Zn, Cu, Cd, As и Hg. Иная картина получена при сопоставлении с нормативами качества воды Канады и США, в частности отмечено нарушение нормативов по содержанию Zn и Cd. Сравнение имеющихся данных с российскими нормативами качества вод также свидетельствует о повышенных содержаниях ряда веществ, в том числе Fe, Si, NH_4^+ , NO_3^- , Hg, Cu, Zn, Mn, Al, органических веществ по БПК₅ (табл. 1). Поверхностные воды в дельте Меконга в целом недонасыщены относительно первичных алюмосиликатов и незначительно пересыщены относительно кварца. По мере приближения водных масс к морю отмечается уменьшение их недонасыщенности или даже пересыщение относительно кальцита и доломита.

Водные вытяжки из проб донных отложений, отобранных в январе 2014 г. в рукаве Хамлуонг, имеют макрокомпонентный состав, соответствующий в створах 35 и 75 км от морского края дельты пресным, сульфатным кальциевым и сульфатным магниевым (второго типа) водам, а в 9 км от моря – солоноватым, хлоридным натриевым второго типа.

Таблица 1. Средний химический состав* поверхностных вод в дельте Меконга (4–77 км от морского края) в 2010–2014 гг.

Объект	Рукава Хамлуонг, Кочьен, Кыадай и малые протоки**					В том числе рукав Хамлуонг				
	A*	δ_A	min	max	N	A	δ_A	min	max	N
pH	7.55	0.11	6.7	8.22	20	7.58	0.11	6.96	8.15	12
χ , мС/см	89.9	19.6	2	216.8	20	92.2	25.7	2	209.2	12
мг/дм ³										
Ca ²⁺	34.3	5	10.1	146.3	33	22.4	5.5	10.1	62.7	9
Mg ²⁺	29.2	6	2.9	141.7	33	22.1	15	4.8	141.7	9
Na ⁺	89.3	73.8	6.3	1270	17	154.3	139.6	6.3	1270	9
K ⁺	6.3	4.3	0.7	74.9	17	9.6	8.2	0.7	74.9	9
HCO ₃ ⁻	63.9	59.1	4.8	182.1	3	63.9	59.1	4.8	182.1	3
Cl ⁻	103.2	66.5	3.8	1823.2	27	166.3	110.8	3.8	1823	16
SO ₄ ²⁻	154.7	42.6	1.7	1814.8	54	91	46.7	2.4	645.2	16
NO ₃ ⁻	25.94	2.84	8.31	41.68	20	27.82	3.92	8.311	41.44	12
NH ₄ ⁺	4.591	0.675	0.665	11.386	20	4.675	0.979	0.665	11.39	12
мкг/дм ³										
Fe	1549	161	598	4451	38	1736	273	598	3920	16
Al	120	39	12	553	19	217	81	19	553	8
Mn	22	7	4	63	11	22	7	4	63	11
Zn	353.0	12.8	228.0	453.3	23	343.3	16.6	228.0	453.3	15
Cu	60.5	5.1	1.2	85.4	23	56.4	7.4	1.2	85.4	15
Pb	0.5	0.3	<0.1	4.5	23	0.7	0.4	<0.1	4.5	15
Cd	0.2	<0.2	0.2	0.2	23	0.2	<0.2	0.2	0.2	15
As	0.4	<0.1	0.1	0.7	23	0.4	<0.1	0.1	0.7	15
Hg	0.1	<0.1	<0.1	0.5	23	0.1	<0.1	<0.1	0.5	15

Примечание: * A и δ_A – среднее арифметическое и погрешность его определения; $\delta_A = \sigma \cdot N^{-0.5}$, где σ – стандартное отклонение, N – объём выборки; min, max – минимальное и максимальное значения; ** результаты обобщения данных [Хо, 2011; Доан, 2012; Тон, 2013] и диссертационных материалов

Изменения суммы главных ионов (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻) и перманганатной окисляемости в водной вытяжке повторяют на более высоком уровне тенденции изменения этих показателей в поверхностных водах и характеризуются резким увеличением значений в створе в 9 км от

моря по сравнению с пунктами, расположенными выше по течению. И в 2013 г., и в 2014 г. отмечено увеличение удельной электропроводности и величины рН водных вытяжек по мере приближения к морю. Тенденции изменения концентраций микроэлементов по длине рукавов в разные годы не столь выражены и могут варьировать в широком диапазоне, что объясняется колебаниями факторов, определяющих уровень их содержания как в поверхностных водах, так и в донных отложениях. В частности, к таким факторам в первом приближении можно отнести образование малорастворимых соединений ряда металлов с карбонатами и органическими кислотами. При этом необходимо отметить, что пересыщение вод, оцениваемое методами химической термодинамики, является скорее потенциальным, чем реальным, и в значительной степени зависит от биогеохимических процессов, протекающих в водной среде и донных отложениях [Океанология..., 1979]. Как показано в работе [Савенко, 2000], важную роль в изменении концентраций ряда химических элементов играют и процессы сорбции (десорбции) на минеральных взвешах в зоне смешения речных и морских вод.

Донные отложения рукавов и проток в дельте Меконга содержат тяжёлые металлы и мышьяк в количествах, сопоставимых с их концентрациями в Меконге в пунктах Тан Чау, Ми Тхуан, Кан Тхо и других крупных реках Южной и Юго-Восточной Азии. В ряде случаев уровень содержания некоторых элементов (например, Zn и Cu) заметно превышает соответствующие показатели для других природных зон в Азии (Zn, мг/кг: тундра – 8.71; лесотундра – 10.04; тайга – 46.86; Cu, мг/кг: тундра – 1.69; лесотундра – 5.92; тайга – 22.28 [Савичев, Фунг, 2013]).

Нормативы качества для донных отложений поверхностных водных объектов установлены во Вьетнаме и отсутствуют в РФ. Если исходить из того, что донные отложения играют важную роль в формировании почвенного покрова в поймах и дельтах рек, то для приближённой оценки их экологического состояния можно использовать предельно допустимые

концентрации (ПДК) веществ почвах. С учётом этого было проведено сравнение с нормативами качества донных отложений во Вьетнаме и ПДК, установленными для почв в РФ. Его результаты свидетельствуют о повышенном содержании Mn, As, Cu, Pb, Zn, что следует учитывать при ведении в регионе сельского хозяйства (табл. 2).

Таблица 2. Физико-химические и геохимические показатели донных отложений в дельте Меконга (4–77 км от морского края)

Показатель	Дельта р. Меконг, январь 2013 г., N=20		Рукава Хамлуонг, Кыадай и Кочьен, январь 2013 г., N=16		Рукав Хамлуонг, январь 2014 г., N=3	
	A	δ_A	A	δ_A	A	δ_A
pH*	7.26	0.12	7.38	0.13	7.43	0.17
χ , мС/см	3.04	0.44	3.26	0.05	1.28	0.95
NO ₃ ^{-*} , мг/кг	31.611	2.130	32.417	2.603	4.247	2.090
NH ₄ ⁺ *, мг/кг	47.268	2.889	49.683	3.294	3.072	1.113
Zn, мг/кг	96.571	2.528	95.967	3.084	83.970	1.781
Cu, мг/кг	33.373	0.549	33.245	0.675	17.523	0.260
Pb, мг/кг	3.760	0.423	3.834	0.480	22.687	1.342
Cd, мг/кг	1.111	0.144	1.192	0.170	<0.5	–
As, мг/кг	5.889	0.351	6.204	0.382	<0.5	–
Hg, мг/кг	0.100	0.006	0.107	0.007	–	–

Примечание: * определение в водной вытяжке

В целом, для дельты Меконга характерно достаточно резкое увеличение суммарного содержания растворённых солей и электропроводности поверхностных вод и водных вытяжках из донных отложений в 35–42 км от морского края дельты по сравнению с вышерасположенными участками вследствие смешения морских и речных вод и преобладание аккумуляции наносов над размывом донных отложений на участке 0–31 км от моря. Одновременно с ростом минерализации происходит изменение состояния системы «вода – порода» в зависимости от удалённости от моря и времени взаимодействия воды с минералами. В частности, если поверхностные воды на участке, удалённом от морского края дельты более чем на 10 км, недонасыщены относительно карбонатных минералов, то водные вытяжки из донных отложений уже в 35 км от моря

могут находиться в равновесном или пересыщенном состоянии относительно кальцита и доломита. При этом может происходить выведение из водной среды малорастворимых соединений кальция, магния и ряда других металлов и их накопление в твёрдой фазе донных отложений, а также соосаждение ряда элементов в процессе аккумуляции речных наносов. Определённую роль в переходе металлов из растворённой формы миграции в коллоидную и взвешенную с последующей аккумуляцией в донных отложениях могут играть и органические кислоты. На основе указанных фактов и сформулировано первое защищаемое положение.

Второе защищаемое положение

Индикатором изменения геохимических условий в дельте Меконга является величина рН вод, значения которой могут быть использованы при ориентировочной прогнозной оценке содержания микроэлементов в донных отложениях.

С учётом значения микроэлементов в формировании геоэкологического состояния водных объектов дельты Меконга проведён анализ их изменения в зависимости от удалённости от морского края дельты и причин подобных изменений. В результате были получены как обобщённая характеристика, так и детальная картина распределения на участке протяженностью 0–75 км от моря. Средние содержания в изученных пробах донных отложений рукавов и проток дельты Меконга в целом сопоставимы (с учётом погрешностей определения) с соответствующими показателями ряда подобных водных объектов в Юго-Восточной и Северной Евразии, но при соответствующем сравнении необходимо учитывать величину водного и твёрдого стока, фазу водного режима, удалённость от морского края дельты и русловые процессы. Для подтверждения этого тезиса был рассмотрен механизм влияния перечисленных факторов на уровень содержания микроэлементов в донных отложениях.

Согласно [Михайлов, 1997; Нгуен, 2004; Михайлов, Аракельянц, 2010], исследуемые водные объекты находятся в пределах проникновения приливов

(до 400 км) и обратных течений (110 км), что оказывает существенное влияние на гидрохимический режим дельты и определяет дальность проникновения осолонённых вод в размере 40–50 км от морского края (в ряде случаев до 70 км). Очевидно, что последняя величина зависит от водного режима в устьевой области и меняется в течение многолетнего периода и конкретного гидрологического года. Эта зависимость в упрощённом виде, согласно [Михайлов, 1997], имеет вид:

$$S_x = S_m - (S_m - S_r) \exp\left(-k_s \frac{x}{h_0}\right), \quad (1)$$

где S_x – средняя солёность воды на расстоянии x от начального створа; S_m и S_r – средняя солёность морских и речных вод; k_s – константа, характеризующая затухание скорости течения при смешении морских и речных вод; h_0 – глубина потока при $x = 0$.

Анализ материалов наблюдений подтвердил возможность использования уравнения (1) применительно к рукаву Хамлуонг, в частности – для средних значений удельной электропроводности воды χ_w на расстоянии x от условного створа, расположенного на расстоянии L от морского края. Связь между удельной электропроводностью, солёностью воды или содержанием растворённых ионов в общем случае является нелинейной, в том числе – логарифмической. С учётом этого значения логарифмов концентраций ряда веществ могут изменяться линейно относительно расстояния от морского края дельты, что, например, имеет место в случае рН.

Величина рН является важным показателем взаимодействий в системе «вода – порода». В частности, при увеличении рН возрастает степень насыщения воды относительно малорастворимых соединений металлов, что приводит к выведению из раствора целого ряда веществ, одновременно с которым происходит соосаждение и сорбция на частицах наносов и донных отложений [Шварцев, 1998; Веницианов, 1999; Крайнов, Рыженко, Швец, 2004]. Всё это способствует увеличению концентраций некоторых химических элементов в донных отложениях с учётом соотношения

скоростей взмыва и аккумуляции наносов, микробиологических процессов, присутствия в среде органических кислот, при взаимодействии с которыми происходит образование устойчивых органоминеральных комплексов (во взвешенной и/или коллоидной формах), либо, напротив, малорастворимых соединений с металлами. Предположительно, именно этот механизм и обусловил характер пространственного распределения изученных микроэлементов в донных отложениях дельты Меконга (по данным 2013 г.).

В частности, отмечено статистически значимое увеличение концентраций Pb в донных отложениях рукава Хамлуонг по мере приближения к морскому краю дельты (квадрат корреляционного отношения для уравнения связи Pb и расстояния x $R^2=0.54$ при критическом значении 0.36), причём имеет место определённый разброс значений, обусловленный колебаниями параметров потока и условий взаимодействия в системе «вода – порода – органическое вещество – газ», в том числе изменениями гранулометрического и химического состава донных отложений, скоростей течения, содержаний растворённых газов, температуры воды (рис. 3, табл. 3).

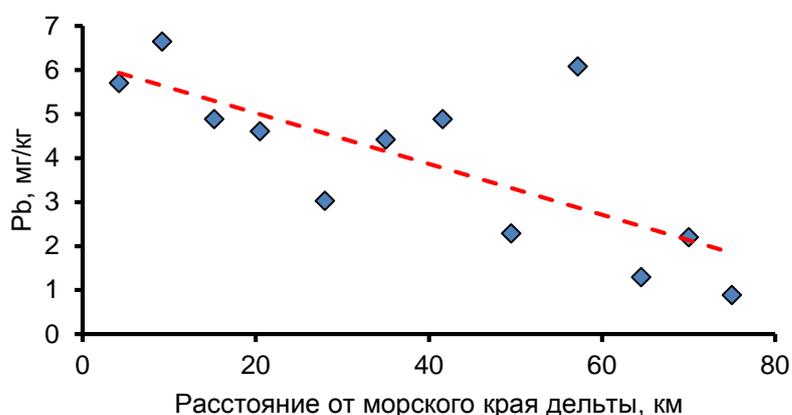


Рис. 3. Изменение концентраций Pb в донных отложениях рукава Хамлуонг в январе 2013 г.: $[Pb]_s = 6.178 - 0.058 x$, $R^2=0.54$

Косвенным подтверждением высказанных выше предположений служат результаты корреляционного анализа полученных данных (табл. 3), свидетельствующие о возможности ориентировочной оценки и прогноза изменений концентраций Pb, Cd, Cu, As, Hg в донных отложениях дельты Меконга по величине pH речных вод с учётом закономерностей изменения

физико-химических показателей исследуемого водного объекта [Hurt et al., 2001; Prathumratana et al., 2008]. В целом, на основе анализа связей между химическим составом и физико-химическими показателями поверхностных вод и донных отложений сформулировано второе защищаемое положение.

Таблица 3. Статистически значимые коэффициенты между физико-химическими и геохимическими показателями воды и донных отложений в дельте Меконга*

	pH(w)	χ (w)	Zn(s)	Cu(s)	Pb(s)	Cd(s)	As(s)	Hg(s)	pH(s)
χ (w)	0.91	1.00	–	–	–	–	–	–	–
Cu(s)	0.47	0.50	0.44	1.00	–	–	–	–	–
Pb(s)	0.78	0.68	0.42	0.53	1.00	–	–	–	–
Cd(s)	0.52	0.45	0.43	0.49	0.60	1.00	–	–	–
As(s)	0.58	0.68	–	0.50	0.57	0.55	1.00	–	–
Hg(s)	0.43	0.64	–	–	–	–	0.72	1.00	–
pH(s)	0.88	0.85	–	–	0.67	0.54	0.71	0.62	1.00
χ (s)	0.92	0.89	–	0.50	0.71	0.41	0.66	0.59	0.93

Примечание: приведены коэффициенты корреляции r при условии (2.6), где N – объём выборки ($N=20$); индекс (s) соответствует пробам донных отложений, а индекс (w) – пробам воды

Третье защищаемое положение

Предложена методика оценки вклада различных факторов в формирование микроэлементного состава донных отложений в дельте больших рек. Показано, что в дельте Меконга основная часть массы Zn, Cu, Pb, Cd в донных отложениях и значительная часть массы As (73 %) и Hg (69 %) формируется за счёт осаждения частиц наносов, в состав которых непосредственно включены указанные микроэлементы. Сорбция на осаждающихся частицах и выведение из раствора малорастворимых соединений обеспечивают накопление 27 % массы As и 31 % массы Hg.

Микроэлементный состав донных отложений неизбежно связан с процессами их формирования. Выявление соответствующих связей является исключительно сложной проблемой вследствие как нерешённости многочисленных вопросов в области русловых процессов, в целом, и

процессов формирования дельты Меконга, в частности (например, существующие оценки твёрдого стока данной реки и его изменений по длине изменяются в очень широком диапазоне), так и практически отсутствием методологии изучения формирования химического состава донных отложений в дельтах больших рек. Последний вопрос неразрывно связан с разработкой теории формирования гидрогенных месторождений полезных ископаемых, что дополнительно определяет актуальность рассматриваемого исследования. С учётом имеющихся данных о промерных работах на рукаве Хамлуонг [Тон Т.Х., 2013] и выполненных работ по изучению химического состава донных отложений предложен следующий алгоритм выявления связей между процессами формирования донных отложений и их состава и оценки аккумуляции микроэлементов в донных отложениях.

Во-первых, необходимо определить масштабы аккумуляции или размыва донных отложений. Для решения этой задачи нами использован метод А.В. Караушева [1969], основанный на использовании упрощенного одномерного уравнения транспорта наносов в размываемом русле при условии незначительности изменения расхода влекомых наносов по длине реки в среднем для всего сечения потока:

$$\Delta h_b = \frac{G_s \cdot \Delta t}{1 - \lambda}, \quad (2)$$

$$G_s = (u + k) \cdot S - k \cdot S_{ss}, \quad (3)$$

где Δh_b – изменение высотной отметки дна; G_s – результирующий вертикального расхода наносов с поверхности дна; λ – пористость грунта; Δt – расчётный временной интервал; S – содержание взвешенных наносов (мутность потока); S_{ss} – мутность взмыва; u – средняя гидравлическая крупность частиц диаметром D_{as} ; k – коэффициент пропорциональности.

Гидрологические характеристики и параметры потока определяются по результатам измерений. В рассматриваемом случае использована следующая исходная информация: а) расходы воды, м³/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 [Ле Т.Т. и др., 2012]; б) уклон водной поверхности 0.008 м/км [Совместное управление..., 2010]; в) профили поперечного сечения рукава Хамлуонг (№ 1 – в 72 км от морского края, № 2 – в 49.5 км, № 3 – в 14 км, № 4 – в 1 км; рис. 4); в сечении № 1 и 2 – в 2000 г., а в сечении № 3, 4 – в 1999 и 2000 гг. [Тон Т.Х., 2013]; в) средний диаметр взвешенных наносов D_{as} принят в размере 0.006 мм [Хо Т.Т., 2001].

Коэффициенты шероховатости n_M определялись обратным расчётом по формулам Маннинга и Шези при расходе 3978 м³/с для каждого профиля. 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/м³ [Михайлов, Аракельянц, 2010]) равной транспортирующей способности потока S_{tr} по формуле А.В. Караушева [1969]:

$$S_{tr} = \Gamma \cdot S_{ss} . \quad (4)$$

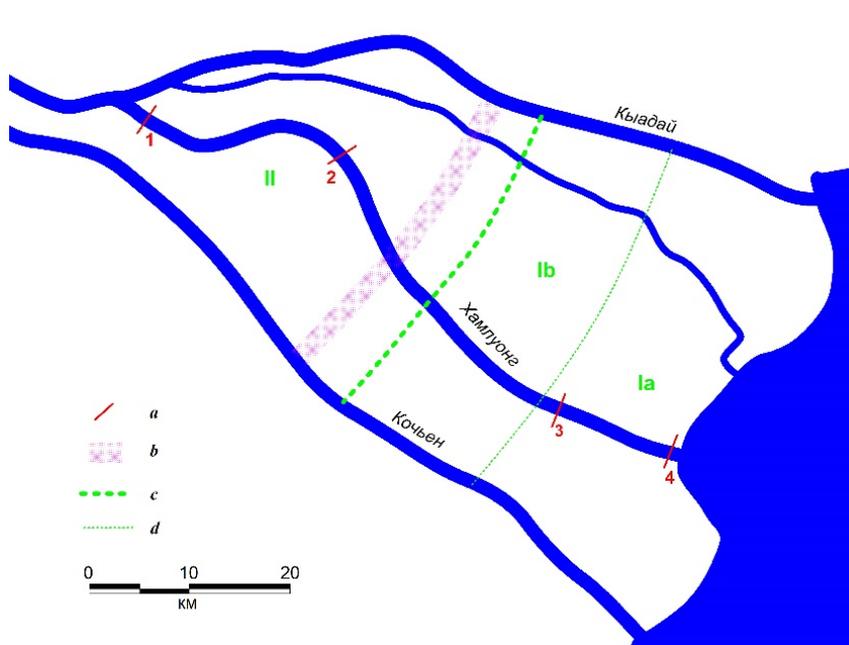


Рис. 4. Схема расположения расчётных створов на рукаве Хамлуонг: а) расчётные створы 1–4; б) участок относительно резкого изменения электропроводности поверхностных вод в 2013 г.; в) граница участков с потенциально преобладающей аккумуляцией (I) и разываемым или стабильным руслом (II); д) граница участков, донные отложения на которых могут использоваться при инженерной защите прибрежных территорий (Ia) и для нужд сельского хозяйства (Ib, II)

В расчётные значения Δh_b , вычисленные по формуле (2), вводились поправки с учётом измеренных в 1999–2000 гг. деформаций русла (аккумуляция наносов): в створе № 3 – 0.118 м/год; в створе № 4 – 0.200 м/год.

$$\Delta h_b^* = k_{\Delta} \cdot \Delta h_b, \quad (5)$$

где k_{Δ} – соотношение суммы месячных значений Δh_b к измеренному годовому значению (в створах № 3, 4 – по данным, полученным для соответствующих профилей, в створах № 1, 2 – по данным для профиля № 3). Интерпретация результатов расчётов транспортирующей способности заключается, прежде всего, в выявлении общих тенденций аккумуляции наносов или размыва дна, но не в количественной оценке русловых деформаций – сложнейшей задачи в рамках специального исследования.

Полученные результаты свидетельствуют о потенциальном преобладании размыва донных отложений (или стабильном русле) в верхней части рукава Хамлуонг (створы № 1 и 2) и аккумуляции наносов – в его нижней части (створы № 3 и 4), что объясняется снижением средних скоростей 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 створах № 3 и 4 характерны для сентября и октября.

Во-вторых, выделяются участки с потенциально 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 получено, что значимые различия характерны для As и Hg.

В-третьих, рассчитывается масса микроэлементов в донных отложениях на участке с преобладанием аккумуляции наносов (табл. 5) с учётом пористости грунта при условии плотности наносов 2650 кг/м³. Объём аккумуляции наносов определяется суммированием частных объёмов наносов между расчётными створами, которые, в свою очередь, – умножением расстояния между смежными створами на среднее значение площади поперечного сечения (в створе 31 км от морского края дельты площадь сечения равна нулю). В случае рукава Хамлуонг объём аккумуляции наносов составил 7927753 м³, масса – 12605128 т/год.

Таблица 4. Средние концентрации микроэлементов в донных отложениях рукава Хамлуонг на характерных участках, мг/кг

Показатель	Zn	Cu	Pb	Cd	As	Hg
Участок с преобладающей аккумуляцией наносов (0–31 км от моря)						
Среднее арифметическое A	98.689	35.110	4.977	1.456	7.617	0.131
Погрешность определения δ_s	4.159	1.316	0.929	0.336	0.759	0.127
Участок без преобладающей аккумуляции (31–75 км от моря)						
Среднее арифметическое A	92.265	32.564	3.154	1.021	5.531	0.090
Погрешность определения δ_s	6.705	1.158	0.847	0.364	0.872	0.123
Критерий Стьюдента k_{St}	0.73	1.54	1.63	0.99	2.94	4.06

В-четвёртых, на основе полученных данных проводится расчёт массы осаждённых 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) в случае рукава Хамлуонг интерпретируется как результат действия преимущественно процессов сорбции микроэлементов на оседающих частицах и выведения из раствора малорастворимых соединений. Вклад биогеохимических процессов непосредственно для крупных рукавов в дельте Меконга представляется менее значительным по сравнению с другими факторами. Но их роль, предположительно, возрастает при уменьшении скоростей течения в малых протоках и пойменных водоёмах.

Таблица 5. Масса аккумуляции микроэлементов на участке преобладающей аккумуляции наносов (0–31 км от морского края дельты), т/год

Показатель	Zn	Cu	Pb	Cd	As	Hg
Масса аккумуляции M_1 на участке 0–31 км от моря, т/год	1243.99	442.57	62.74	18.35	96.01	1.65
Масса аккумуляции M_2 на участке 31–75 км от моря, т/год	1163.01	410.47	39.76	12.87	69.72	1.13
Разница ($M_1 - M_2$) с учётом проверки на однородность, т/год (% M_1)	0	0	0	0	26.29 (27.4)	0.52 (31.3)

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 Hg связано с сорбцией микроэлементов на частицах осаждающихся наносов и 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. Таким образом, обобщение полученных результатов позволяет сформулировать третье защищаемое положение.

Заключение

На основе данных геохимических исследований, выполненных в 2001–2014 гг., получена общая характеристика химического состава и качества поверхностных вод и донных отложений в дельте реки Меконг на территории Социалистической республики Вьетнам. Установлены средние значения концентрации микроэлементов в донных отложениях рукавов Хамлуонг, Кочьен, Кыадай и ряда протоков.

Показано, что в зависимости от удалённости от моря (по мере смешения морских и речных вод и аккумуляции наносов) и времени взаимодействия воды с минералами и органоминеральными соединениями (в течение гидрологического года от летне-осенних паводков до зимне-весенней межени и при переходе от поверхностных вод к водным вытяжкам из осадков) происходит увеличение минерализации поверхностных вод и водных вытяжек из донных отложений, а также аккумуляция наносов на участке 0–31 км от морского края дельты. Одновременно с этим наблюдается и изменение состояния системы «вода – газ – органическое вещество – порода», связанное с уменьшением недонасыщенности поверхностных вод, достижением равновесия и даже некоторого пересыщения относительно карбонатных минералов в водных вытяжках донных отложений на участке до 10 км от морского края дельты. Образование и последующее выведение из водной среды малорастворимых соединений, а также сопряжённые с ними сорбционные процессы могут послужить причиной накопления ряда микроэлементов в донных отложениях.

Предложено использовать значения рН поверхностных вод в качестве индикатора текущих и прогнозных изменений содержаний ряда микроэлементов в донных отложениях. Для количественной оценки связи геохимических и гидрологических процессов предложена методика, основанная на использовании метода А.В. Караушева 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. 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; 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 (рис. 4).

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации (в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ)

1. Савичев, О.Г. Зональные закономерности изменения химического состава речных отложений Сибири и условия его формирования / О.Г. Савичев, **Т.З. Фунг** // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 157–161.
2. Савичев, О.Г. Эколого-геохимическое состояние поверхностных вод и донных отложений в дельте Меконга (Вьетнам) / О.Г. Савичев, **Т.З. Фунг** // Вестник Томского гос. университета. – 2014 – № 388. – С. 246–252.
3. Фунг, Т.З. Связи между микроэлементным составом донных отложений и процессами осадконакопления в дельте реки Меконг (Вьетнам) / **Т.З. Фунг**, О.Г. Савичев // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 1. – С. 64–72.

Публикации в других научных изданиях

4. **Фунг, Т.З.** Роль водной экосистемы для социально-экономического развития защиты окружающей среды в зоне устья реки Хамлуонг / Т.З. Фунг, Х.Т. Фи, Х.Л. Фан, К.Х. Нгуен // Научная инициатива иностран. Аспирантов: докл. VI Всерос. конф. – Томск: ТПУ, 2013. – С. 440–444.
5. **Фунг, Т.З.** Роль наземной сельскохозяйственной экосистемы для социально-экономического развития защиты окружающей среды в зоне

- устья реки Хамлуонг / Т.З. Фунг, Х.Т. Фи, Х.Л. Фан, К.Х. Нгуен // Научная инициатива иностран. студентов и аспирантов рос. вузов: докл. VI Всерос. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 444–446.
6. **Фунг, Т.З.** Распределение расходов в паводковом и меженном сезоне в системе стоков реки Меконг / Т.З. Фунг, Х.Л. Фан // Научная инициатива иностран. студентов и аспирантов рос. вузов: докл. VI Всерос. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 508–512.
 7. **Фунг, Т.З.** Методика исследования химического состава донных отложений протоки Хамлуонг – элемента дельты реки Меконг / Т.З. Фунг // Труды XVII Междунар. симп. студентов и мол. ученых им. ак. М.А. Усова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 586–587.
 8. **Фунг, Т.З.** Водный режим протоки Меконга–Хамлуонг / Т.З. Фунг, Х.Л. Фан // Науки о земле современное состояние: Матер. I Всерос. конф. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2013. – С.182–184.
 9. **Фунг, Т.З.** Разработка устройства по взятию образцов речных донных отложений / Т.З. Фунг, Х.Л. Фан, В.Т. Фан, Ш. Тон // Матер. V межвуз. конф. по итогам практик. – Москва. Изд-во «Перо», 2013. – С. 59–62.
 10. **Фунг, Т.З.** Оборудования и техника взятия образцов речных донных отложений / Т.З. Фунг, Х.Л. Фан, В.Т. Фан, Ш. Тон // Матер. V межвуз. конф. по итогам практик. – Москва: Изд-во «Перо», 2013. – С. 63–67.
 11. **Фунг, Т.З.** Содержание меди в донных отложениях в зоне устья реки Меконг по сравнению с другими реками и районами на территории Вьетнама / Т.З. Фунг, Х.Л. Фан, Ф.Х. Тринь, В.Т. Фан, Ш. Тон // Геология и полезные ископаемые четвертичных отложений: матер. конф. – Минск, 2014. – С. 11–12.
 12. **Фунг, Т.З.** Содержание меди в воде в зоне устья реки Меконг по сравнению с другими реками и районами на территории Вьетнама / Т.З. Фунг, Х.Л. Фан, Ф.Х. Тринь, Ш. Тон, В.Т. Фан // Матер. X Межрегион. конф. – Уфа: Изд-во ГУП, 2014. – С. 244–246.