

УДК 556.06:551.482.212

МИНЕРАЛОГО–ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ МАЛЫХ РЕК В МЕЖДУРЕЧЬЕ РЕК ЛО И КАУ (СЕВЕРНЫЙ ВЬЕТНАМ)

Савичев Олег Геннадьевич¹,
OSavichev@mail.ru

Домаренко Виктор Алексеевич¹,
victor_domarenko@mail.ru

Перегудина Елена Владимировна¹,
pere-elena@mail.ru

Нгуен Ван Луен²,
Luyennv@yahoo.com

Шалдыбин Михаил Викторович¹,
ShaldybinMV@tpu.ru

Канаки Алексей Владимирович³,
KanakiA@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Институт геологии и минеральных ресурсов,
Вьетнам, 100000, г. Ханой, Чьен Тханг, Тхань Суан, 67.

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Актуальность работы. Исследования минерального и химического состава донных отложений имеют важное значение в разработке и усовершенствовании методик гидрогеохимических поисков полезных ископаемых и решения задач нормирования антропогенного воздействия на поверхностные и подземные водные объекты.

Цель работы: оценка минерального и химического состава речных отложений в междуречье рек Ло и Кау (север Вьетнама) как причины и следствия процессов формирования геохимических аномалий в водных объектах.

Методы исследования: математическое моделирование, ландшафтно-геохимический и статистические методы, методы определения химического и минерального состава донных отложений.

Результаты и выводы. Получены данные о минеральном и химическом составе донных отложений рек Бан Тхи и Дай (Северный Вьетнам, провинция Баккан) в меженный период 2016 г. Выполнен анализ взаимосвязей между минеральным и химическим составом донных отложений водотоков, водных вытяжек из них и речных вод. Показано, что концентрации целого ряда химических элементов прямо пропорциональны содержанию хлоритов и обратно пропорционально содержанию кварца. Установлено, что карбонатный барьер играет важную роль в регуляции химического состава речных вод в зоне влияния горнодобывающих предприятий, связанных с добычей свинцово-цинковых руд. Получены ориентировочные оценки расстояния переноса твёрдых частиц (до 34 км в период дождей) и среднего времени приближения к насыщению речных вод относительно кальция (примерно 9,4 часа). Обоснован вывод о ключевой роли геохимических барьеров в формировании геоэкологических условий разработки месторождений твёрдых полезных ископаемых, в том числе снижении концентраций цинка, свинца и ряда других элементов в речных водах и донных отложениях на участках до 10–11 км.

Ключевые слова:

Северный Вьетнам, донные отложения, минеральный и химический состав, малые реки, геохимические аномалии.

Введение

Выявление геохимических аномалий является одним из важных этапов поисков полезных ископаемых, а также оценки фактического и допустимого состояния компонентов окружающей среды. Обычно решение этой задачи сводится к отбору и последующему анализу большого количества проб коренных пород, почв, донных отложений водных объектов, поверхностных, подземных и атмосферных вод, фрагментов растительности по узлам регулярной сети пунктов с плотностью

один комплекс проб компонентов окружающей среды на 4 км² и более. Вследствие этого подобные работы в целом трудоёмки и дорогостоящи вплоть до полной потери рентабельности [1]. С учётом этого в Томском политехническом университете (ТПУ) проводятся исследования с целью совершенствования как методик геохимических и гидрогеохимических поисков полезных ископаемых, экологического мониторинга, так и геохимических моделей, на основе которых эти методики разработаны [2–4].

В частности, авторами в последние годы была разработана и апробирована упрощённая математическая модель изменения химического состава речных вод и донных отложений в зависимости от площади водосбора и слоя водного стока:

$$C = C_0 \frac{Y_0}{Y} \left(\frac{F_0}{F} \right)^k, \quad (1)$$

где C , Y , F – концентрация вещества (мг/дм³ или мг/кг), слой водного стока (мм) и площадь водосбора (км²) в расчётном створе; C_0 , Y_0 , F_0 – концентрация вещества (мг/дм³ или мг/кг), слой водного стока (мм) и площадь водосбора (км²) в истоках реки без выраженной русловой сети; k – эмпирический коэффициент, учитывающий размерность элементов уравнения (1) и отражающий зависимость между слоем стока и средней глубины потока, а также удельную скорость трансформации вещества [5].

В работе [6] было предложено описание водного стока в виде:

$$Y_a = \mu H_a \exp\left(-\frac{E_0}{H_a}\right) \left(1 + \frac{Cv_H^2 E_0^2}{2H_a^2}\right), \quad (2)$$

$$\mu = k_{Y,1} k_Z^{k_{Y,2}} (f_F + 1)^{k_{Y,3}} (f_M + 1)^{k_{Y,4}}, \quad (3)$$

$$k_Z = \begin{cases} Z_b - 500, & Z_b > 500 \\ 1, & Z_b \leq 500 \end{cases}, \quad (4)$$

где Y_a – среднееголетний слой водного стока, мм/год; H_a – среднееголетний слой общего увлажнения, складывающегося из жидких атмосферных осадков, водоотдачи из снежного покрова и ледовых образований; Cv_H – коэффициент вариации годовых значений слоя общего увлажнения; E_0 – среднееголетнее значение испаряемости, мм/год; μ – функция влияния физико-географических условий на водный сток; Z_b – средняя высота водосбора, м; f_M – заболоченность водосбора, %; f_F – лесистость водосбора, %; $k_{Y,1}$, $k_{Y,2}$, $k_{Y,3}$, $k_{Y,4}$ – эмпирические коэффициенты (величина $k_{Y,4}$ обычно принимает отрицательные значения). Это позволило исключить трудоёмкие работы по определению слоя водного стока и (с учётом уравнений (2–4), а также допущения постоянства увлажнения и испаряемости на водосборе) привести (1) к виду:

$$C = C_0 \frac{\mu_0}{\mu} \left(\frac{F_0}{F} \right)^k, \quad (5)$$

где μ и μ_0 – функция влияния физико-географических условий на водный сток на исследуемом водосборе в целом и его верхней части без выраженной русловой сети.

В дальнейшем модель (1, 3–5) была дополнена анализом сопряжённости речной сети и тектонических нарушений [1]. При его проведении густота речной сети интерпретируется как вероятность направленного движения поверхностных вод по водосбору $P(r)$, плотность распространения тектони-

ческих нарушений в пределах водосбора (отношение суммарной длины нарушений к площади водосбора) – как вероятность $P(f)$, а условная вероятность $P(r/f)$ – как характеристика сопряжённости речной сети и тектонических нарушений.

Наиболее полную адаптацию этого подхода к решению региональных геохимических задач выполнил Нгуен Ван Луен, показавший для междуречья рек Ло и Кау на севере Вьетнама, что вероятность обнаружения аномальных концентраций Pb и Zn в донных отложениях и речных водах заметно возрастает при условии, что соотношение F/F_0 меньше 6–7, а величина $P(r/f)$ превышает 0,6 км/км² [7]. В то же время остались нерешёнными вопросы объяснения полученных критерийных значений F/F_0 и $P(r/f)$ на основе анализа минерального и химического состава компонентов окружающей среды, без чего невозможно эффективное применение модели (1, 5) в других регионах. Это и определило цель исследования – выявление закономерностей территориального изменения минерального и химического состава речных отложений в северной части Вьетнама.

Объекты и методика исследования

В качестве объектов исследования выбраны реки Бан Тхи, Дай и их притоки Ченгу (впадает в реку Бан Тхи), Фодай, Намду (в реку Дай) – малые водотоки в бассейне реки Хонг (Красная). Река Дай – элемент системы «Дай–Ло–Хонг», река Бан Тхи – элемент системы «Бан Тхи–Гам–Ло–Хонг». Водосборы указанных рек расположены в низко- и среднегорье. В их геологическом строении принимают участие отложения ордовик-силурийской и девонской системы, местами прорванные разновозрастными интрузивами габбро-гранитной серии. Рассматриваемая территория характеризуется наличием множественных проявлений и мелких месторождений свинца, цинка, железа, марганца, разрабатываемых в настоящее время или ранее [7–10].

Ранее, в работах [1, 7, 11], достаточно подробно охарактеризован химический состав вод речных вод и водных вытяжек из донных отложений в уезде Чодонь провинции Баккан. В том числе 19–20 февраля 2016 г. Нгуен Ван Луеном были отобраны 11 проб речных вод и 11 проб донных отложений (рис. 1; пробоотбор проводился из верхнего слоя толщиной 20 см с последующим отсевом фракции менее 0,5 мм). Лабораторные работы выполнены в ТПУ (аккредитованная гидрогеохимическая лаборатория при кафедре гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии; номер государственной аккредитации № РОСС RU.0001.511901 от 12.07.2011 г.) с использованием потенциометрического (рН), титриметрического (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , CO_2 , Cl^- , перманганатная и бихроматная окисляемости), турбидиметрического (SO_4^{2-}), фотометрического (Si, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-}) методов, масс-спектрометрического метода с индуктивно-связанной плазмой (с использовани-

ем масс-спектрометра NexION 300D: Si, Li, Al, P, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Ag, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Au, Hg, Pb, Bi), ионной хроматографии (Na^+ , K^+).

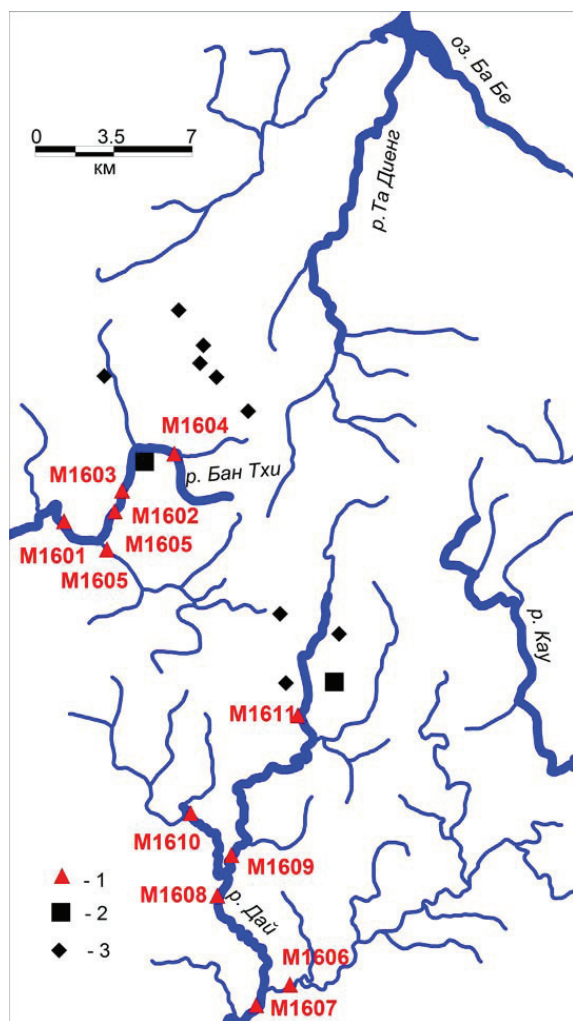


Рис. 1. Схема расположения пунктов отбора проб речных вод и донных отложений малых водотоков в междуречье рек Ло и Кау 19–20 февраля 2016 г.: 1 – пункты отбора проб речных вод и донных отложений; 2 – горнообогатительные фабрики; 3 – рудники

Fig. 1. Layout of sampling points in the area between the Lo and Kau minor rivers on 19–20 February, 2016: 1 are the sampling points of river waters and sediments; 2 are the ore factories; 3 are the mines

Химический состав водных вытяжек в некотором приближении может рассматриваться как характеристика наиболее подвижных форм химических элементов в донных отложениях. Поэтому в 2017 г. в тех же (заранее подготовленных и хранившихся в герметичных ёмкостях) образцах были дополнительно выполнены: 1) проведен количественный анализ на различные элементы на томском исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т НИИЯФ при ТПУ, использовался метод ИНАА (инструментальный нейтронно-активационный анализ), который может определять concentra-

цию (мг/кг) 28 химических элементов. В основе метода лежит регистрация радиоактивных радионуклидов, которые появляются при облучении исследуемых проб (навеска 0,1 г) потоком нейтронов с интегральной дозой $2 \cdot 10^{13}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. При проведении измерений использовался гамма-спектрометр с германий-литиевым детектором; 2) для определения минерального состава донных отложений использовался сканирующий электронный микроскоп HITACHI S-3400N с энерго-дисперсионной приставкой Bruker X Flash 4010. Элементарная составляющая была получена при фиксации тормозящего рентгеновского излучения. Пробы исследовались при низком вакууме в режиме обратно-рассеянных электронов. Лабораторные работы выполнены сотрудниками кафедры геоэкологии и геохимии ТПУ: химический состав – аналитики А.Ф. Судыко, Л.В. Богутская; электронная микроскопия – аспирант Е.В. Перегудина Съёмка дифрактограмм проводилась на дифрактометре Rigaku Ultima IV при следующих параметрах: анод – Cu, 40 кВ, 30 мА, 1,2 кВт, скорость $1^\circ/\text{мин}$, шаг $0,02^\circ$, в диапазоне углов 4–65 (аналитик – А.В. Канаки).

Анализ результатов рассматриваемого исследования и ранее полученных материалов [1, 7, 11] включал:

1) расчёт индексов насыщения η речных вод и водных вытяжек относительно ряда минералов и органоминеральных комплексов;

$$\eta = \lg \dot{I} \dot{A} - \lg K_{\text{неq}}, \quad (6)$$

где ПА – произведение активностей группы веществ; $K_{\text{неq}}$ – константа неустойчивости; кроме ряда минералов, также учитывалась возможность образования соединений ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} с гуминовыми кислотами (ГК), концентрация которых была определена расчётным путём по эмпирической зависимости от перманганатной окисляемости [11]; описание методики термодинамических расчётов приведено в [12];

2) корреляционный и регрессионный анализ результатов термодинамических расчётов и данных о минеральном и химическом составе донных отложений; коэффициент корреляции r_{xy} величин x и y принимался статистически значимым (с уровнем значимости 5 %) при выполнении условия (7), а регрессионная зависимость (например, вида $y = a_0 + a_1 \cdot x$) – при условии, что квадрат корреляционного отношения [13] $R^2 > 0,36$, а коэффициенты регрессии (a_i) по модулю меньше удвоенной погрешности их определения:

$$|r| > 2(1 - r_{xy}^2)(N - 1)^{-0,5}, \quad (7)$$

где N – объём выборки. Расчёты выполнены с использованием пакета MS Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ полученных материалов показал, что во фракции донных отложений исследуемых рек с частицами диаметром менее 0,5 мм преобладает

кварц, достаточно широко представлены слюды, гидрослюды и хлориты (табл. 1). Менее распространены полевые шпаты группы плагиоклазов и карбонаты, причём наибольшее содержание кальцита (3 %) отмечено в 2,8 км ниже по течению от горно-обогатительной фабрики. Выше по течению от фабрики кальцит не отмечен вовсе.

Концентрации большинства изученных химических элементов (Cr, Co, Ba, Cs, Sc, Rb, U, Th, Nd, Sm, Lu, Yb, Tb, Ta, Eu, La, Fe и Ce) во фракции донных отложений с диаметром частиц менее 0,5 мм прямо пропорциональны содержанию каолинита и хлорита, слюд и гидрослюд и обратно пропорциональны содержанию кварца. Примерно для этих же элементов и минералов характерна соответствующая связь с содержанием серы в водной вытяжке из донных отложений. В то же время прямая статистически значимая корреляция с содержанием полевых шпатов отмечена для Co, Cr, Sm, Lu, Yb, Nd, Cs, Tb, Sc, Rb, Ta, Eu, La, U, Th; с содержанием кальцита – для Ca, Fe, Au, As, Ag, Br, Zn, Co, Sb (табл. 2).

Подобные взаимосвязи объясняются следующим. Во-первых, в период повышенной водности (с расходами воды выше среднегодовых значений, обычно – с июня по сентябрь) происходит вынос частиц взвешенных и влекомых наносов с относительно незначительной устойчивостью к химическому выветриванию. В последующий меженный период, по мере снижения транспортирующей способности потока при уменьшении расходов воды, происходит аккумуляция этих частиц и активизируется, с одной стороны, процесс их химического выветривания, а с другой стороны, сорбционные процессы [14–16].

Для проверки этой гипотезы были рассчитаны ориентировочные значения протяжённости участков переноса взвешенных наносов L_{ss} для максимальных, среднемноголетних и меженных расходов воды из условий (8–15):

$$L_{ss} \cdot u_{d,a} \approx v_a \cdot h_a, \quad (8)$$

$$v_t \approx \frac{v_a}{\sqrt{N_K}}, \quad (9)$$

$$u_{d,a} \approx v_t, \quad (10)$$

$$N_K = \frac{M_K \cdot C_{Ch}}{g}, \quad (11)$$

$$M_K = \begin{cases} 0,7 \cdot C_{Ch} + 6, & 10 \leq C_{Ch} \leq 60 \\ 48, & C_{Ch} > 60 \end{cases}, \quad (12)$$

$$C_{Ch} = \frac{h_a^6}{n_r}, \quad (13)$$

$$v_a \approx C_{Ch} \cdot \sqrt{h_a \cdot J}, \quad (14)$$

$$u_{d,a} \approx k_u \cdot \sqrt{D_{ss,a}}, \quad (15)$$

где $u_{d,a}$ – гидравлическая крупность частиц наносов со средним диаметром $D_{ss,a}$; v_a – средняя скорость течения; v_t – среднее абсолютное значение пульсационной скорости согласно [17, 18]; C_{Ch} – коэффициент Шези; n_r – коэффициент шероховатости; J – уклон водной поверхности; h_a – средняя глубина потока; k_u – коэффициент, учитывающий форму и размер частицы (принято среднее значение 0,154 для $u_{d,a}$ в м/с и $D_{ss,a}$ в мм); g – ускорение свободного падения.

Меженные расходы воды приняты по материалам полевых работ, выполненных Нгуен Ван Луюном в феврале 2016 г., среднемноголетний расход воды рассчитан по модулю стока реки Гам в створе пункта Чемхоа [7], максимальный дождевой расход обеспеченностью 10 % – по формуле (16) согласно [19]. Глубина и ширина потока при разных расходах воды определена подбором (методом Ньютона) из условия (17) согласно [20], скорость течения вычислена по формуле Шези (14):

$$Q_{\max,10\%} = k_Q \cdot a_{10\%} \cdot F, \quad (16)$$

$$M_\Gamma = \frac{h_a (gB)^{0,25}}{Q^{0,5}}, \quad (17)$$

где Q – расход воды ($Q_{\max,10\%}$ – расчётный максимальный расход дождевого паводка обеспеченностью 10 %); k_Q – сборный коэффициент, учитывающий размерность величин в формуле (16), влияние площади водосбора и уклона реки на интенсивность осадков, оказывающую влияние на расход воды в реке; $a_{10\%}$ – интенсивность дождя; F – площадь водосбора; B – ширина потока; M_Γ – константа устойчивости русла согласно [20]. Результаты расчёта (рис. 2) свидетельствуют о том, что максимальный перенос взвешенных частиц в период дождей может достигать не менее 34 км, в среднем перенос составляет около 1,4–4,0 км на реке Бан Тхи и 1,7–3,0 км – на реке Дай.

В меженный период речные воды не равновесны к первичным алюмосиликатам, но близки к равновесию к кварцу, карбонатам и соединениям кальция и магния с гуминовыми кислотами (табл. 3). Время взаимодействия частиц наносов и донных отложений возрастает по мере удаления от истоков рек. Соответственно, для больших и средних рек в общем случае должна увеличиваться доля устойчивых к химическому выветриванию частиц, что вполне подтверждается результатами анализа минерального состава донных отложений, как изученных рек Вьетнама, так и реки Томь в Западной Сибири [12]. В частности, в составе фракции донных отложений диаметром менее 0,5 мм преобладает кварц, причём наблюдается последовательное увеличение его доли по мере приближения к устью (табл. 1).

Для реки Бан Тхи изменение доли кварца в донных отложениях происходит не столь выра-

женно, что объясняется как меньшими значениями водного стока (следовательно, меньшей промытостью водосбора), так и влиянием притока Ченгу (пункт M1601 расположен ниже по течению от устья этой реки). Также следует отметить, что указанные гидрологические и геохимические процессы являются стохастическими и нестационарными. Например, растворение полевых шпатов, входящих в состав донных отложений, может блокироваться слоем глинистых отложений [21], размыв которых меняется во времени по длине и ширине потока случайным образом. Поэтому о каких-либо пространственно-временных закономерностях изменения химического и минерального состава донных отложений можно говорить только в статистическом смысле.

Во-вторых, согласно [22–24], карбонатный барьер играет важную роль в регулировании химического состава речных вод и водных вытяжек из донных отложений. С одной стороны, этот барьер ограничивает рост концентраций главных ионов в речных водах, а с другой – в ряде случаев

способствует снижению общей минерализации, о чём свидетельствует как изменение концентраций главных ионов, так и индексов насыщения относительно карбонатных минералов (табл. 1, 3). Аналогичный эффект, возможно, связан и с образованием малорастворимых соединений ряда металлов с гуминовыми кислотами [25–27].

В рамках ориентировочной оценки времени релаксации геохимической системы был использован следующий алгоритм: 1) значения индексов насыщения вод и водных вытяжек из донных отложений рек Бан Тхи и Дай (ниже по течению от горно-обогатительных фабрик) аппроксимируются полиномами вида (18):

$$\eta_L = \sum_{i=0}^3 b_i (L + \Delta L)^i, \quad (18)$$

где η_L – значение индекса насыщения относительно кальцита на расстоянии L от истока реки; b_i – эмпирический коэффициент; L – расстояние створа от истока реки; ΔL – удаление от створа, при котором наступает максимальное приближение к

Таблица 1. Характеристика минерального и химического состава донных отложений малых рек в междуречье рек Ло и Кау 19–20 февраля 2016 г.

Table 1. Characteristic of mineral and chemical composition of river bottom sediments in the area between the Lo and Kau minor rivers on the 19–20 February, 2016

Показатель/Index	Единицы измерения Units	Пункт отбора проб воды (рис. 1)/Points of water sampling (Fig. 1)										
		M1604	M1603	M1602	M1601	M1605	M1611	M1609	M1608	M1607	M1610	M1606
		Бан Тхи/ Ban Thi			Ченгу Chengu	Дай/ Dai				Намду Namdu	Фодай Pho Dai	
Геологическая формация* Geological formation	–	Pia Phuong				Mia Le; Khao Loc	Phu Ngu			Pia Phuong	Phu Ngu	
Морфометрические и гидрологические характеристики рек и их водосборов Morphometric and hydrological characteristics of rivers and their catchment areas												
Длина реки от истока L Length of the river head L	км km	3,68	7,84	8,99	13,14	7,98	16,12	29,57	32,82	41,68	11,32	32,9
Площадь водосбора F Area of the river basin F	км ² km ²	16,1	71,4	75,4	134	48	43,8	110,5	164,8	182,3	40,8	129
Скорость течения v_s /Velocity v_s	м/с/m/s	0,08	0,19	0,09	0,12	0,26	0,20	0,45	0,20	0,27	0,20	0,42
Расход воды Q Discharge Q	м ³ /с/m ³ /s	0,23	0,42	0,42	0,71	0,29	0,98	1,24	3,46	4,39	1,11	1,53
Содержание минерала во фракции донных отложений с диаметром частиц <0,5 мм Mineral content in the river fraction of bottom sediments with particle diameter <0,5 mm												
Класс оксидов: кварц/Quartz	–	78,0	73,0	83,4	46,0	59,2	68,1	74,1	83,0	88,2	90,0	90,0
Класс силикатов: группа полевых шпатов: подгруппа плагиоклаза Plagioclase	–	3,6	2,1	1,0	2,5	2,0	3,6	1,2	1,0	1,3	1,0	1,0
Класс силикатов: группа полевых шпатов (КПШ): подгруппа ортоклаза/Potassium feldspar	–	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	2,8	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0
Класс карбонатов: кальцит Calcite	–	0,0	3,0	2,2	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Класс силикатов: группы слюд и гидрослюд (предположительно – мусковит/иллит) Muscovite/illite	–	11,5	13,4	9,8	40,4	34,2	14,0	14,0	7,5	6,8	8,0	8,0
Класс силикатов: группа глинистых минералов: каолинит Kaolinite	–	1,6	1,5	1,1	2,6	1,3	3,5	2,5	1,5	1,0	0,0	0,0
Класс силикатов: группа хлоритов/Chlorite	–	5,3	6,0	2,5	5,5	2,3	8,0	8,2	6,0	2,7	1,0	1,0

Окончание табл. 1.

Table 1.

Показатель/Index	Единицы измерения Units	Пункт отбора проб воды (рис. 1)/Points of water sampling (Fig. 1)										
		M1604	M1603	M1602	M1601	M1605	M1611	M1609	M1608	M1607	M1610	M1606
Геологическая формация* Geological formation	–	Бан Тхи/ Ban Thi				Ченгу Chengu	Дай/ Dai				Намду Namdu	Фодай Pho Dai
		Pia Phuong				Mia Le; Khao Loc	Phu Ngu				Pia Phuong	Phu Ngu
Содержание химических элементов во фракции донных отложений с диаметром частиц <0,5 мм Concentration of elements in the river fraction of bottom sediments with particle diameter <0,5 mm												
Ca	%	0,845	1,957	2,019	1,526	0,846	0,929	0,944	0,954	0,793	0,536	0,503
Na		0,198	0,150	0,110	0,096	0,217	0,059	0,062	0,046	0,105	0,010	0,048
Fe		2,675	5,397	5,214	4,177	3,193	4,889	3,821	2,700	2,329	1,541	1,124
Sm	мг/кг mg/kg	3,178	3,918	3,549	7,412	5,593	6,661	4,053	3,452	3,857	2,567	1,602
Ce		40,36	47,28	39,60	94,65	16,23	88,92	57,17	48,14	58,32	40,36	25,67
Lu		0,224	0,298	0,267	0,491	0,417	0,514	0,295	0,262	0,256	0,144	0,159
U		1,205	1,927	1,224	2,350	2,296	2,895	2,133	1,010	1,384	0,962	0,811
Th		5,651	8,292	6,203	16,171	12,694	16,069	13,284	9,668	10,567	6,944	5,004
Cr		45,45	69,62	61,04	85,27	90,37	94,00	81,73	66,73	62,48	47,98	46,50
Yb		1,761	2,050	2,046	3,725	2,822	3,214	2,160	1,953	2,115	1,093	1,328
Au		0,034	0,044	0,030	0,012	0,003	0,005	0,008	0,003	0,006	0,006	0,011
Hf		4,427	3,344	2,445	5,211	7,139	6,298	5,325	5,860	6,532	4,365	5,208
Ba		154,48	228,68	256,43	550,48	520,47	406,42	302,45	235,01	231,01	143,21	124,06
Sr		17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	26,52	17,50	17,50
Nd		12,18	19,50	20,61	40,97	28,14	38,67	22,83	22,11	23,59	12,37	8,88
As		121,83	294,27	274,81	52,50	22,27	105,06	57,73	32,30	15,25	8,29	2,90
Ag		0,500	7,245	5,619	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
Br		2,857	6,884	0,250	5,945	0,250	0,250	4,983	2,175	2,698	2,168	1,210
Cs		4,053	6,711	4,117	14,835	12,805	13,709	9,815	6,710	6,271	4,647	2,456
Tb		0,365	0,599	0,387	0,871	0,546	0,847	0,741	0,518	0,457	0,317	0,164
Sc		6,258	8,774	8,217	14,180	11,405	16,060	10,366	7,354	6,997	4,154	3,409
Rb		53,95	82,81	64,85	163,03	152,86	178,76	142,60	108,80	92,63	67,79	52,36
Zn		1491,51	7424,95	8232,14	1070,63	388,07	894,15	690,99	250,78	202,34	238,65	79,20
Ta	0,692	0,480	0,775	0,810	0,958	1,063	0,863	0,595	0,593	0,469	0,373	
Co	9,30	16,31	17,34	18,17	13,15	19,99	13,53	9,92	8,98	6,25	4,19	
Eu	0,606	0,897	0,924	1,418	1,112	1,825	0,721	0,785	0,619	0,356	0,244	
La	20,12	26,55	22,86	49,72	36,81	48,60	27,44	22,44	26,13	20,04	9,73	
Sb	4,224	12,755	10,620	3,722	2,683	5,141	3,237	1,773	1,508	1,885	0,767	

Примечание: * разделение на геологические формации даны по [9]: формация Khao Loc: верхняя субформация ($D_{1-2}kl_1$) – черные известняки, мергели; нижняя субформация ($D_{1-2}kl_2$) – глинисто-серпичитовые сланцы, кварцитовидные песчаники с тонкими прослоями известняков; формация Mia Le – верхняя субформация (D_1ml_1) – песчаники, известняки, мергели, переслаивающиеся с глинистыми сланцами и известковистыми филлитами; нижняя субформация (D_1ml_2) – глинистые, мергелистые сланцы, глинистые известняки и аргиллиты; формация Pia Phuong: верхняя субформация (D_{1pp_2}) – серпичит-кварцевые сланцы, риолитовые, кварц-альбитовые туфы, мраморы; нижняя субформация (D_{1pp_1}) – глинисто-серпичитовые сланцы, черные битуминозные аргиллиты, филлиты, доломитовые известняки и мраморы; формация Phu Ngu: верхняя субформация ($O_3-S_1pn_3$) – кварцевые песчаники, кварциты, с прослоями биотит-андалузит-кордиеритовых сланцев; средняя субформация ($O_3-S_1pn_2$) – черные глинисто-кремнистые сланцы, туфоалевролиты, линзы известняков; нижняя субформация ($O_3-S_1pn_1$) – сланцы, песчаники с тонкими прослоями кремнистых аргиллитов, известковые алевролиты, туфобрекчий.

Note: * the geological formations are divided according to [9]: Khao Loc formation: upper subformation ($D_{1-2}kl_1$) – black limestones, marls; Lower subformation ($D_{1-2}kl_2$) – clay-sericite shales, quartzite sandstones with thin interlayers of limestones; Formation Mia Le – upper subformation (D_1ml_1) – sandstones, limestones, marls interbedded with clay shales and calcareous phyllites; Lower subformation (D_1ml_2) – clay and marl shales, clay limestones and mudstones; Formation Pia Phuong: upper subformation (D_{1pp_2}) – sericite-quartz schists, rhyolite, quartz-albitophyre tuffs, marbles; Lower subformation (D_{1pp_1}) – clay-sericite shales, black bituminous mudstones, phyllites, dolomite limestones and marbles; Phu Ngu formation: upper subformation ($O_3-S_1pn_3$) – quartz sandstones, quartzites, with interlayers of biotite-andalusite-cordierite schists; Middle subformation ($O_3-S_1pn_2$) – black clay-siliceous shales, tuff siltstones, limestone lenses; Lower subformation ($O_3-S_1pn_1$) – shales, sandstones with thin interlayers of siliceous shales, calcareous siltstones, tuffs.

насыщению речных вод относительно кальцита; для водных вытяжек принято $\Delta L=0$, для речных вод $\Delta L=v_a \cdot \tau_{eq}$, где τ_{eq} – время приближения к термодинамическому равновесию; 2) для речных вод ищется значение τ_{eq} , при котором достигается минимум функции (19):

$$f(\eta) = \sqrt{\frac{\sum_L (\eta_{L,w} - \eta_{L,ws})^2}{(N-1)D_{\eta,ws}}}, \quad (19)$$

где $\eta_{L,w}$ и $\eta_{L,ws}$ – индекс насыщения речных вод и водной вытяжки из донных отложений относи-

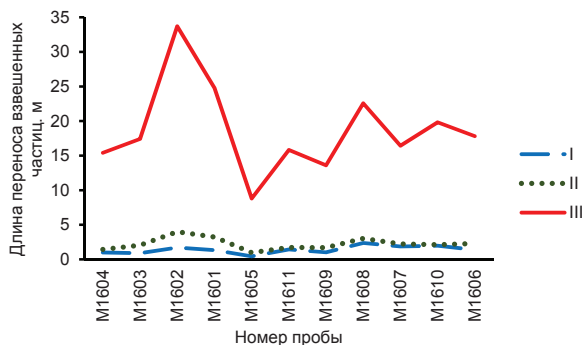


Рис. 2. Ориентировочные значения протяжённости переноса взвешенных частиц в меженьный период в феврале 2016 г. (I), при норме водного стока (II) и максимальном дождевом паводке обеспеченностью 10 % (III)

Fig. 2. Approximate values of extension suspended particle transport in the low flow in February, 2016 (I), at norm of a water discharge (II) and the maximal rain flow with 10 % probability (III)

тельно кальцита на расстоянии L от истока реки; N – количество расчётных створов; $D_{\tau,ws}$ – дисперсия индексов насыщения водных вытяжек.

В результате время τ_{eq} для условий февраля 2016 г. оценено в размере 9,4 часа. С учётом времени переноса взвешенных веществ фактическое время релаксации гидрогеохимической системы к равновесию составляет от 4,2 до 9,4 часа (минимум – разница между $\tau_{eq}=9,4$ часа и временем перемещения взвешенных наносов со средней скоростью v_0). Таким образом, с учётом средней скорости течения равновесие речных вод с кальцитом достигается на расстоянии от 2,5–3,0 км до 10–11 км, что в целом совпадает с выводами, полученными Нгуен Ван Луеном в результате анализа данных наблюдений и использования имитационной математической модели [7].

Заключение

На основе обобщения указанных аспектов формирования геохимического состояния речных вод

Таблица 2. Статистически значимые коэффициенты корреляции между показателями минерального и химического состава фракции донных отложений с диаметром частиц менее 0,5 мм (при уровне значимости 5 %)

Table 2. Statistically significant factors of correlation between parameters of mineral and chemical composition in the fraction of bottom sediments with diameter of particles less than 0,5 mm (for a significance value 5 %)

Химический элемент Element	Содержание в речных водах Concentration in river water	Содержание в водной вытяжке из донных отложений Concentration in water extraction	Содержание серы в водной вытяжке из донных отложений Sulfur concentration in the extraction of water sediments	Кварц Quartz	Плагиоклазы Plagioclase	КПШ Potassium feldspar	Кальцит Calcite	Иллит/Мусковит Illite/Muscovite	Каолинит Kaolinite	Хлорит Chlorite	Средний диаметр взвешенных частиц $D_{0,05}$ Particle diameter	Уклон реки River slope
Ca	0,66	-	-	-	-	-	0,90	-	-	-	-0,55	-
Na	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,62	0,67
Fe	-0,58	-	0,49	-0,51	-	-	0,67	-	0,67	0,58	-0,65	-
Sm	-	-	0,67	-0,89	0,56	0,49	-	0,77	0,80	0,50	-	-
Ce	-	-	0,58	-	-	-	-	-	0,76	0,63	-	-
Lu	0,68	-	0,76	-0,87	0,58	0,61	-	0,72	0,84	0,54	-	-
U	0,70	0,86	0,76	-0,80	0,58	0,61	-	0,63	0,84	0,62	-	-
Th	-	-	0,69	-0,76	-	0,49	-	0,64	0,81	0,58	-	-
Cr	-	-0,75	0,71	-0,77	-	0,60	-	0,64	0,78	0,57	-	-
Yb	0,62	-	0,64	-0,90	0,53	-	-	0,78	0,80	0,49	-	-
Au	-	0,64	-	-	-	-	0,62	-	-	-	-0,57	0,68
Ba	-	-	0,52	-0,92	-	-	-	0,89	0,64	-	-	-
Nd	-	-	0,71	-0,80	-	0,51	-	0,67	0,80	0,51	-	-
As	-	-	-	-	-	-	0,68	-	-	-	-0,61	0,52
Ag	-	0,91	-	-	-	-	0,72	-	-	-	-	-
Br	-	0,53	-	-	-	-	0,56	-	-	-	-	-
Cs	-	0,75	0,66	-0,88	-	0,51	-	0,78	0,78	0,51	-	-
Tb	-	-	0,66	-0,78	-	0,49	-	0,57	0,92	0,79	-	-
Sc	-	-	0,80	-0,83	0,56	0,61	-	0,64	0,90	0,64	-	-
Rb	-	0,63	0,73	-0,77	-	0,57	-	0,65	0,80	0,58	-	-
Zn	-	0,79	-	-	-	-	0,73	-	-	-	-	-
Ta	-	-	0,77	-0,65	0,51	0,50	-	0,52	0,79	0,51	-0,49	-
Co	-	-	0,66	-0,69	-	0,51	0,59	-	0,80	0,60	-	-
Eu	-	-	0,84	-0,75	0,61	0,72	-	0,56	0,85	0,57	-0,49	-
La	-	-	0,72	-0,85	0,57	0,54	-	0,72	0,81	0,50	-	-
Sb	-	-	-	-	-	-	0,74	-	-	-	-0,59	-
S	0,89*	Нет данных	1,00	-	0,51	0,68	-	-	0,91	0,76	-	-

Примечание: * сера сульфат-иона в водной вытяжке.

Note: * sulphur of sulphate ion in water extract.

Таблица 3. Индексы насыщения речных вод (W) и водных вытяжек (E) из донных отложений в междуречье рек Ло и Кау в феврале 2016 г.

Table 3. Indexes of saturation of river waters (W) and water extracts (E) from bottom sediments in the area between the Lo and Kau minor rivers in February, 2016

Номер Number	Реакция Reaction	Компонент Component	Пункт отбора проб воды (рис. 1), длина реки от истока (км) Water sampling point (Fig. 1), the length of the river from the source (km)										
			M1604	M1603	M1602	M1601	M1605	M1611	M1609	M1608	M1607	M1610	M1606
I	$\text{CaCO}_3(\text{calcite}) = \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	W	-0,01	-0,10	0,47	0,05	-0,11	-0,27	0,00	0,03	-0,40	-0,16	-1,52
		E	-8,92	-0,24	-0,39	-8,66	-8,64	-8,51	-8,63	-8,59	-8,78	-9,00	-9,04
II	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2(\text{dolomite}) = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2\text{CO}_3^{2-}$	W	-0,30	-0,31	0,71	-0,02	-0,27	-0,42	0,14	0,17	-0,63	-0,34	-2,53
		E	-18,23	-0,98	-1,32	-17,88	-17,96	-17,35	-17,56	-17,67	-17,86	-18,48	-18,17
III	$\text{Ca}(\text{ГК}) = \text{Ca}^{2+} + \text{ГК}$	W	1,10	1,08	1,11	1,08	1,04	0,97	0,91	0,92	0,83	1,02	0,45
		E	0,74	0,88	0,90	0,96	0,94	1,21	0,95	0,92	0,82	0,62	0,58
IV	$\text{SiO}_2(\text{quartz}) + 2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_4\text{SiO}_4^0$	W	0,29	0,22	0,22	0,28	0,30	0,42	0,43	0,36	0,43	0,29	0,55
		E	0,04	-0,04	-0,28	0,00	-0,16	0,06	0,11	-0,04	-0,08	-0,10	0,00
V	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{anorthite}) + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{kaolinite})$	W	-18,15	-18,19	-18,04	-18,17	-18,35	-18,77	-19,10	-19,09	-19,51	-18,56	-21,36
		E	-23,96	-22,34	-21,32	-22,84	-21,25	-22,43	-23,35	-22,51	-22,23	-22,08	-22,70
VI	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{anorthite}) + 2\text{H}^+ + 6\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}(\text{gibbsite}) + \text{Ca}^{2+}$	W	-4,87	-5,15	-4,06	-4,75	-4,98	-4,78	-4,10	-4,19	-4,71	-4,97	-5,81
		E	-5,68	-4,91	-5,58	-5,16	-5,39	-5,48	-5,24	-5,56	-5,65	-5,19	-6,02
VII	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8(\text{albite}) + 7\text{H}_2\text{O} + \text{H}^+ = \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}(\text{gibbsite}) + \text{Na}^+ + 3\text{H}_4\text{SiO}_4^0$	W	-205,08	-205,26	-204,83	-204,89	-204,93	-204,19	-203,80	-204,12	-204,04	-205,06	-204,07
		E	-205,97	-205,85	-206,69	-205,65	-206,16	-205,64	-205,39	-205,90	-205,80	-206,07	-205,83
VIII	$\text{ZnSO}_4(\text{zincite}) = \text{Zn}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$	W	-12,12	-11,35	-11,29	-11,49	-13,24	-10,88	-12,39	-12,72	-12,62	-12,56	-13,46
		E	-16,86	-17,23	-16,91	-16,76	-17,04	-16,16	-16,52	-16,98	-17,30	-17,85	-16,99
IX	$\text{ZnCO}_3(\text{smithsonite}) = \text{Zn}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	W	1,11	1,72	2,23	1,68	-0,01	1,73	0,70	0,53	0,38	0,75	-0,84
		E	-12,35	-4,39	-4,62	-12,86	-13,05	-12,86	-12,67	-12,77	-12,96	-13,06	-12,39

Примечание: отрицательные значения индекса η в уравнении (б) указывают на недосыщение, а положительные – на пересыщение раствора относительно минералов или веществ.

Note: negative values of the index η indicate a lack of saturation, and positive values indicate a supersaturation of the solution with reference to minerals or substances.

и донных отложений можно предположить, что наличие русловой сети, сопряжённой с тектоническими нарушениями (характеризуемое величиной P (r/f)), в целом является индикатором поступления вещества на рассматриваемый участок водосбора (по терминологии авторов работы [28], как при «ближнем», так и при «дальнем» переносе), а соотношение площади водосбора и его части без выраженной русловой сети (F/F_0) – индикатором потенциальной «сохранности» источника химических элементов или «устойчивости» геохимического и/или гидродинамического барьеров, являющихся причиной их долговременной аккумуляции в геосистеме даже при отсутствии явного коренного источника. Причём наилучшие условия для аккумуляции вещества будут характерны для обстановок, в которых при достаточном притоке вещества величина F/F_0 в геологическом времени последовательно уменьшается. В случае существенных колебаний F/F_0 вероятность формирования геохимических аномалий заметно снижается даже в случае интенсивного притока веществ. Соответственно, уменьшается и вероятность

обнаружения крупных месторождений полезных ископаемых, что, впрочем, не исключает возможность обнаружения проявлений или небольших по запасам месторождений. Именно такая ситуация в части распространения небольших месторождений свинцово-цинковых руд характерна и для рассматриваемого района Вьетнама.

Геоэкологические условия разработки месторождений полезных ископаемых в значительной степени определяются наличием карбонатного и, возможно, гуматного барьеров, функционирующие которых, в свою очередь, зависит от гидрологического режима. Роль последнего двояка: в период повышенной водности потенциально увеличивается механическое выветривание и перенос, в период пониженной водности – химическое. Комплексное воздействие гидрологических факторов в рассматриваемом районе проявляется в среднем на участках протяжённости около 3–5 км, максимально – до 10–11 км.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-05-00042.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Improved method for hydrochemical exploration of mineral resources / Nguyen Van Luyen, O.G. Savichev, V.A. Domarenko, Quach Duc Tin // Vietnam Journal of Earth Sciences. – 2017. – № 39 (2). – P. 167–180. DOI: 10.15625/0866-7187/39/2/9703.
2. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth // Geochemistry International. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
3. Домаренко В.А. Рациональная методика поисков и геолого-экономической оценки месторождений руд редких и радиоактивных элементов. – В 2-х ч. Ч. I. Прогнозирование. Поиски и оценка. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2012. – 167 с.
4. Копылова Ю.Г., Гусева Н.В. Гидрогеохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2014. – 184 с.
5. Способ выделения геохимических аномалий на основе анализа химического состава речных отложений: пат. № 2548608, Российская Федерация, С2.; заявл. 26.07.2013; опубл. 20.04.2015, Бюл. № 11. – 8 с.
6. Савичев О.Г., Решетько М.В., Моисеева Ю.А. Методика реконструкции зонального водного стока в Западной Сибири в голоцене // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 5. – С. 87–96.
7. Нгуен Ван Луен. Эколого-геохимическое состояние подземных и речных вод, донных отложений водотоков в северной части Вьетнама (на примере уезда Чодонь, провинция Баккан): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2017. – 22 с.
8. Дао Мань Тиен. Методология и особенности геохимической специализации гранитоидных формаций Северного Вьетнама: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Баку, 1984. – 198 с.
9. Нгуен Кинг Куок. Карта геологических условий и минеральных ресурсов в масштабе 1:200000. Лист – провинция Баккан F48-XV. – Ханой: Главное управление геологии и полезных ископаемых Вьетнама, 2001. / на вьетнам. яз.
10. Chemical characteristics of Pb-Zn ores and their tailings in the northern Vietnam / S. Ishihara, P. Dung, P.N. Can, T.A. Tran // Shigen-Chishitsu. – 2012. – V. 62. – № 1. – P. 27–34. DOI: <http://doi.org/10.11456/shigenchishitsu.62.27>.
11. Савичев О.Г., Нгуен В.Л. Гидроэкологическое состояние междуречья рек Гам и Кау (Северный Вьетнам) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 7. – С. 96–103.
12. 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.
13. 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.
14. Sources, speciation and transformation of arsenic in the gold mining impacted Jiehe River, China / Y. Cai, H. Zhang, G. Yuan, F. Li // Applied Geochemistry. – 2017. – № 84. – P. 254–261. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.07.001>.
15. Evaluation of arsenic sorption and mobility in stream sediment and hot spring deposit in three drainages of the Tibetan Plateau / Y. Zhang, S. Li, L. Zheng, J. Chen, Y. Zheng // Applied Geochemistry. – 2017. – V. 77. – P. 89–101. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.04.006>.
16. Using total suspended solids (TSS) and turbidity as proxies for evaluation of metal transport in river water / T. Nasrabadi, H. Ruegner, Z.Z. Sirdari, M. Schwientek, P. Grathwohl // Applied Geochemistry. – 2016. – V. 68. – P. 1–9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.03.003>.
17. Караушев А.В. Речная гидравлика. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 416 с.
18. Hendricks M.R. Introduction to Physical Hydrology. – New York: Oxford University Press Inc., 2010. – 331 p.
19. Mujumdar P.P., Kumar D.N. Floods in a Changing Climate // Hydrologic Modeling. – New York, USA: Cambridge University Press, 2012. – 177 p.
20. Гришанин К.В. Устойчивость речных русел и кинематические волны // Труды Государственного гидрологического института. Вып. 190. Исследования морфологии и гидравлики речных русел, пойм и водоёмов для нужд строительного проектирования. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – С. 37–56.
21. Banwart S.A. Aqueous Speciation at the Interface between Geological Solids and Groundwater // Modelling in Aquatic Chemistry / Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. – Paris, France: OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. – P. 245–288.
22. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. – М.: Высш. шк., 1975. – 341 с.
23. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швецов В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
24. White W.M. Geochemistry. – Ithaca, New York, USA: John Wiley&Sons, Ltd, Cornell University, 2013. – 660 p.
25. Ephraim J.H., Allard B. Metal Ion Binding by Humic Substances // Modelling in Aquatic Chemistry / Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. – Paris, France: OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. – P. 207–244.
26. Chemical immobilization of metals and metalloids by phosphates / E.G. Hafsteinsdottir, D. Camenzuli, A.L. Rocavert, J. Walworth, D.B. Gore // Applied Geochemistry. – 2015. – V. 59. – P. 47–62. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.03.014>.
27. Dynamic interplay between uranyl phosphate precipitation, sorption, and phase evolution / P. Sumudu Munasinghe, M.E. Elwood Madden, S.C. Brooks, A.S. Elwood Madden // Applied Geochemistry. – 2015. – V. 58. – P. 147–160. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.04.008>.
28. Россыпные месторождения России и других стран СНГ (мирагенция, промышленные типы, стратегия развития минерально-сырьевой базы) / Н.Г. Патык-Кара, Б.И. Беневольский, Л.З. Быховский, Л.Б. Зубков, А.А. Кременецкий, Е.В. Матвеева, В.А. Мелкий, В.Е. Минорин, А.Г. Мочалов, Н.М. Риндзюнская, Б.В. Рыжов, Л.В. Спорыхина, Е.А. Черемисина / отв. ред. Н.П. Лавёров, Н.Г. Патык-Кара. – М.: Научный мир, 1997. – 479 с.

Поступила 18.08.2017 г.

Информация об авторах

Савичев О.Г., доктор географических наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Томского политехнического университета.

Домаренко В.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Томского политехнического университета.

Перегудина Е.В., аспирант кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Томского политехнического университета.

Нгуен Ван Луен, научный сотрудник, Институт геологии и минеральных ресурсов.

Шалдыбин М.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Томского политехнического университета.

Канаки А.В., кандидат физико-математических наук, инженер кафедры прочности и проектирования Физико-технического факультета Томского государственного университета.

UDC 556.06:551.482.212

MINERAL-GEOCHEMICAL FEATURES OF THE MINOR RIVER SEDIMENTS IN THE INTERFLUVE AREA OF THE LO AND KAU RIVERS (NORTHERN VIETNAM)

Oleg G. Savichev¹,
OSavichev@mail.ru

Viktor A. Domarenko¹,
viktor_domarenko@mail.ru

Elena V. Peregudina¹,
pere-elena@mail.ru

Nguyen Van Luyen²,
Luyennv@yahoo.com

Michail V. Shaldybin¹,
ShaldybinMV@tpu.ru

Aleksey V. Kanaki³,
KanakiA@mail.ru

¹ Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources,
67, Chien Thang, Thanh Xuan, Ha Noi, 100000, Vietnam.

³ Tomsk State University,
36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. Investigations of mineral and chemical composition of river sediments have great meaning in development and improvement of techniques of hydrogeochemical study of minerals and decisions of tasks for normalization of anthropogenous influence on surface and ground water objects.

The aim of the research is to estimate mineral and chemical composition in river bottom sediments of the area between the Lo and Kau rivers (Northern Vietnam) as causes and effects of formation of geochemical anomalies in water objects.

Methods of the research: mathematical modelling, landscape-geochemical and statistical methods, methods of definition of chemical and mineral composition of river bottom sediments.

Results and conclusions. The data on mineral and chemical composition of the Ban Thi, Dai rivers and their tributaries sediments were obtained. The authors have analyzed the interrelations between mineral and chemical composition of river bottom sediments, water extracts from them and river waters. It is shown that concentrations of some chemical elements find the direct ratio to the contents of chlorite and in inverse proportion to the contents of quartz. It is ascertained that carbonate barrier plays the important role in regulation of chemical composition of river waters in the affected area of mining plants associated with the extraction of lead-zinc ores. The authors obtained the approximate estimations of hard sediment particles transport distance (up to 34 km at rain period) and the average time of approximation to saturation of river waters relative to calcite (approximately 9,4 h). The conclusion on the key role of geochemical barriers in formation of geocological conditions of ore extractions, including decrease of zinc, lead and some other elements concentration in river waters and sediments on the distance up to 10–11 km is proved.

Key words:

Northern Vietnam, river sediments, mineral and chemical composition, minor rivers, geochemical anomalies.

The research was financially supported by the RFBR grant no. 17-05-00042.

REFERENCES

1. Nguyen Van Luyen, Oleg G. Savichev, Viktor A. Domarenko, Quach Duc Tin. Improved method for hydrochemical exploration of mineral resources. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 2017, no. 39 (2), pp. 167–180. DOI: 10.15625/0866-7187/39/2/9703.
2. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
3. Domarenko V.A. *Ratsionalnaya metodika poiskov i geologo-ekonomicheskoy otsenki mestorozhdeniy rud redkikh i radioaktivnykh elementov. Ch. I. Prognozirovanie i otsenka* [Rational methodology of prospecting and geological and economic evaluation of ore deposits of rare and radioactive elements. P. I. Forecasting. Searches and evaluation]. Tomsk, Tomsk Polytechnic university Publ. house, 2012. 167 p.
4. Kopylova Yu.G., Guseva N.V. *Gidrogeokhimicheskie metody poiskov mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Hydrogeochemical methods of searching ore deposits]. Tomsk, Tomsk Polytechnic university Publ. house, 2014. 184 p.
5. Savichev O.G., Domarenko V.A., Reshetko M.V. *Sposob vydeleniya geokhimicheskikh anomaly na osnove analiza khimicheskogo sostava rechnykh otlozheniy* [Method of allocation of geochemical

- anomalies on the basis of the analysis of a chemical composition of river sediments]. Patent RF, no. 2548608, 2015.
6. Savichev O.G., Reshetko M.V., Moiseeva Yu.A. Methods of reconstruction of a zonal runoff in western Siberia in Holocene. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 5, pp. 87–96. In Rus.
 7. Nguen Van Luen. *Ekologo-geohimicheskoe sostoyanie podzemnykh i rechnykh vod, donnykh otlozheny vodotokov v severnoy chasti Vietnama (na primere uezda Chodon, provintsiya Bakkan)*. Dis. Kand. nauk [Ecological and geochemical condition of ground and river waters, river sediments of the minor rivers in the Northern part of Vietnam (by the example of Chodon district, Baccan province). Cand. Diss.]. Tomsk, 2017. 22 p.
 8. Dao Man Tien. *Metodologiya i osobennosti geokhimicheskoy spetsializatsii granitoidnykh formatsiy Severnogo Vietnama*. Dis. Kand. nauk [Methodology and features of geochemical specialization of granite formations of Northern Vietnam. Cand. Diss.]. Baku, 1984. 198 p.
 9. Nguyen Kinh Quoc. The Map of geological conditions and mineral resources in scale 1:200000 of Bac Kan province, sheet F48-XV. Hanoi, General Department of Geology and Minerals of Vietnam, 2001. In Vietnamese.
 10. Ishihara S., Dung P., Can P.N., Tran T.A. Chemical characteristics of Pb-Zn ores and their tailings in the northern Vietnam. *Shigen-Chishitsu*, 2012, vol. 62, no. 1, pp. 27–34. DOI: <http://doi.org/10.11456/shigenchishitsu.62.27>.
 11. Savichev O.G., Nguyen Van Luyen. Hydroecological condition between the Gam and Kau rivers (Northern Vietnam). *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 7, pp. 96–103. In Rus.
 12. 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]. *Geokologiya – Geoecology*, 2003, no. 2, pp. 108–119.
 13. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual mod-els. Part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, no. 10 (3), pp. 282–290.
 14. Cai Y., Zhang H., Yuan G., Li F. Sources, speciation and transformation of arsenic in the gold mining impacted Jiehe River, China. *Applied Geochemistry*, 2017, no. 84, pp. 254–261. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.07.001>.
 15. Zhang Y., Li S., Zheng L., Chen J., Zheng Y. Evaluation of arsenic sorption and mobility in stream sediment and hot spring deposit in three drainages of the Tibetan Plateau. *Applied Geochemistry*, 2017, vol. 77, pp. 89–101. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.04.006>.
 16. Nasrabadi T., Ruegner H., Sirdari Z.Z., Schwientek M., Grathwohl P. Using total suspended solids (TSS) and turbidity as proxies for evaluation of metal transport in river water. *Applied Geochemistry*, 2016, vol. 68, pp. 1–9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.03.003>.
 17. Karaushev A.V. *Rechnaya gidravlika* [River hydraulics]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969. 416 p.
 18. Hendricks M.R. *Introduction to Physical Hydrology*. New York, Oxford University Press Inc., 2010. 331 p.
 19. Mujumdar P.P., Kumar D.N. Floods in a Changing Climate. *Hydrologic Modeling*. New York, USA, Cambridge University Press, 2012. 177 p.
 20. Grishanin K.V. *Ustoychivost rechnykh rusel i kineticheskie volny* [Stability of river channels and kinematic waves]. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta. Vypusk 190. Issledovanie morfologii i gidravliki rechnykh rusel, poym i vodoemov dlya nuzhd stroitel'nogo proektirovaniya* [Materials of the State hydrological institute. Iss. 190. Researches of morphology and hydraulics of river channel, flood plain and reservoirs for needs of building designing]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972. pp. 37–56.
 21. Banwart S.A. *Aqueous Speciation at the Interface between Geological Solids and Groundwater. Modelling in Aquatic Chemistry*. Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. Paris, France, OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. pp. 245–288.
 22. Perelman A.I. *Geokhimiya landshaftov* [Geochemistry of the landscape]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1975. 341 p.
 23. Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod: teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of ground waters: theoretical, applied and environmental aspects]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 677 p.
 24. White W.M. *Geochemistry*. Ithaca, New York, USA, John Wiley&Sons, Ltd, Cornell University, 2013. 660 p.
 25. Ephraim J.H., Allard B. Metal Ion Binding by Humic Substances. *Modelling in Aquatic Chemistry*. Eds. I. Grenthe and I. Puigdomenech. Paris, France, OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. pp. 207–244.
 26. Hafsteinsdottir E.G., Camenzuli D., Rocavert A.L., Walworth J., Gore D.B. Chemical immobilization of metals and metalloids by phosphates. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 59, pp. 47–62. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.03.014>.
 27. Sumudu Munasinghe P., Elwood Madden M.E., Brooks S.C., Elwood Madden A.S. Dynamic interplay between uranyl phosphate precipitation, sorption, and phase evolution. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 58, pp. 147–160. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.04.008>.
 28. Patyk-Kara N.G., Benevolsky B.I., Byhlovsky L.Z., Zubkov L.B., Kremenetsky A.A., Matveev E.V., Melky V.A., Minorin B.E., Mochalov A.G., Ridzyunskaya N.M., Ryzhov B.V., Sporykhina L.V., Cheremisina E.A. *Rosсыпные месторождения России и других стран СНГ (минерогения, промышленные типы, стратегия развития минерально-сырьевой базы)* [Placer deposits of Russia and other CIS countries (Minerageny of places, geological and commercial types and development of raw materials base)]. Eds. N.P. Laverov, N.G. Patyk-Kara. Moscow, Nauchny mir Publ., 1997. 479 p.

Received: 18 August 2017.

Information about the authors

Oleg G. Savichev, Dr. Sc., professor, Tomsk Polytechnic University.

Viktor A. Domarenko, Cand. Sc., associate professor, Tomsk Polytechnic University.

Elena V. Peregudina, post-graduate student, Tomsk Polytechnic University.

Nguyen Van Luyen, scientific employee, Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources.

Michail V. Shaldybin, Cand. Sc., associate professor, Tomsk Polytechnic University.

Aleksey V. Kanaki, Cand. Sc., engineer, Tomsk State University.