ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Загрязнение ртутью речных отложений водораздела реки Сиухунь в Индонезии: вклад кустарной мелкомасштабной добычи золота

Вилли К. Нуграха[1,2], Хуйхо Чон[2], Фан Динь Куан[2,3], Рэнди Новирса[2,4], Томохиро Коморита[2], Ясухиро Исибаси[2], Дзюн Кобаяси[2], Кодзи Аризоно[2], Асеп Баю Дани Нандиянто[5]✉

[1] *Исследовательский центр экологии и чистого производства, Национальное агентство исследований и инноваций, Южный Тангеранг, Индонезия*
[2] *Префектурный университет Кумамото, Кумамото, Япония*
[3] *Вьетнамский национальный институт охраны труда и здоровья, Ханой, Вьетнам*
[4] *Университет Андалас, Западная Суматра, Индонезия*
[5] *Индонезийский педагогический университет, Бандун, Индонезия*

Как цитировать эту статью: Вилли К. Нуграха, Хуйхо Чон, Фан Динь Куан, Рэнди Новирса, Томохиро Коморита, Ясухиро Исибаси, Дзюн Кобаяси, Кодзи Аризоно, Асеп Баю Дани Нандиянто. Загрязнение ртутью речных отложений водораздела реки Сиухунь в Индонезии: вклад кустарной мелкомасштабной добычи золота // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16339. С. 59-71. EDN PJVEYI

Аннотация
Кустарная мелкомасштабная добыча золота является крупнейшим искусственным источником загрязнения ртутью – распространенная проблема в настоящее время в мире. Исследование посвящено вкладу кустарной добычи золота в общий объем загрязнения ртутью индонезийского водораздела. Величина загрязнения ртутью измерена с использованием стабильных изотопов углерода и азота. Работа является первым аналитическим отчетом в Индонезии со времен начала публикаций об обнаружении тяжелых металлов в воде и отложениях рек. Ранее не уделялось внимание глубокому анализу загрязнения ртутью и его источникам. Определено, что кустарные и мелкомасштабные точки по добыче золота в верховьях рек являются основным источником ртути в отложениях водораздела р. Сиухунь. Наличие углерода $\delta^{13}C$ и азота $\delta^{15}N$ свидетельствует о загрязнении ртутью водораздела, которое идет из рек Сизимеут и Сиберанг. Результаты анализа образцов поверхностных отложений показали общую концентрацию ртути в отложениях, превышающую допустимую. Биологический эффект показал, что концентрация ртути в большинстве точек отбора проб превышает средние значения диапазона воздействия и предел вероятного воздействия. Значение коэффициента риска по ртути указывает на возможное влияние загрязнения ртутью на бентические организмы. В данном исследовании также обозначены ограничения, требующие дальнейшего изучения.

Ключевые слова
кустарная мелкомасштабная добыча золота; ртуть; отложения; Сиухунь

Финансирование
Данное исследование было профинансировано международной стипендией для аспирантов по исследованию ртутного загрязнения от правительства префектуры Кумамото, Япония.

Поступила: 02.11.2023 ***Принята: 24.09.2024*** ***Онлайн: 11.02.2025*** ***Опубликована: 25.04.2025***

Введение

Загрязнение металлами водораздела р. Сиухунь в последнее время привлекло повышенное внимание из-за урбанизации и индустриализации района [1, 2]. Сиухунь, самая большая река в провинции Бантен, Индонезия, используется для санитарных и ирригационных мероприятий. Водосборная площадь реки 1858 км^2. Река протекает с юга на север, общая длина – 179 км (по данным Заключительного отчета по плану охраны окружающей среды и управления (Бантен, Индонезия, 2019) Агентства по охране окружающей среды и лесному хозяйству провинции Бантен).

Стремительное развитие района и индустриализация в последние десятилетия стали источником различного вида загрязнений р. Сиухунь через два притока: Сизимеут и Сиберанг [3]. В отчете, опубликованном Индонезийским центром экологического права в 2013 г. (Заключительный отчет: Усиление прав на информацию для людей и экологии. С. 1-57), приведена оценка общего

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Вилли К. Нуграха, Хуйхо Чон, Фан Динь Куан, Рэнди Новирса, Томохиро Коморита, Ясухиро Исибаси, Дзюн Кобаяси, Кодзи Аризоно, Асеп Баю Дани Нандиянто, 2025

количества сточных вод, сброшенных в р. Сиухунь, которое составляет 43044,35 м^3/день. Сброс ведется с различных производств, в том числе с производства бумаги, удобрений, пульпы, сжигания угля, гальванопокрытия, производства химикатов наряду с бытовыми отходами. Неочищенные воды сбрасываются в реку и вызывают снижение качества воды в реке, в результате чего концентрация тяжелых металлов в воде и речных отложениях превышает предельно допустимые концентрации, установленные стандартами и правилами. Поэтому с каждым годом растет недовольство местных жителей и напряженность в отношениях с органами местной власти.

Большинство проведенных исследований посвящены загрязнению тяжелыми металлами, однако до сих пор отсутствует информация о загрязнении данных вод ртутью. Самое большое предприятие кустарной мелкомасштабной добычи золота (КМДЗ) в Индонезии расположено в деревне Сизиту района Лебак в провинции Бантен, его нелегальная деятельность ведется в верховьях притоков р. Сиухунь [4]. Согласно отчету Института Блэксмит*, в 2013 г. из 1000 т ртути, используемой при КМДЗ, 95 % участвовало в процессе амальгамации и впоследствии было выброшено в окружающую среду, что нанесло вред большому числу людей – 30000-500000 чел. Это привлекло многих исследователей, которые проанализировали эффект КМДЗ в этой местности. В некоторых исследованиях, выполненных в деревне Сизиту, отмечалось, что концентрация ртути в собранных образцах почвы, речных отложениях, человеческих волосах, крови и в рыбе, отобранных неподалеку от КМДЗ, превышала допустимые нормы [3, 5-7]. Хуже всего, что рыба, выловленная в пруде рядом с деревней, согласно некоторым отчетам, тоже содержала большое количество ртути. По информации [8] 70-90 % органической ртути в рыбе – это метилртуть (CH_3Hg^+) – самая токсичная из всех форм ртути [9]. Определено, что именно КМДЗ является источником загрязнения ртутью.

Загрязнение ртутью в этой местности не происходит постоянно [10]. Ртуть была найдена в определенных точках, где концентрируется добыча золота. Распределение ртути может значительно различаться в зависимости от интенсивности добычи, местной гидрологии и переноса речных осадков [11]. Понимание того, как ртуть переносится по течению реки (например, через отложения, толщу воды, биоту), требует большей плотности сети опробования, что в свою очередь позволит определить пути миграции ртути более точно. Можно предположить, что ртуть, попавшая в реку, растворяется в воде и осаждается в отложениях, что влечет за собой долговременные риски для окружающей среды и здоровья людей, живущих ниже по течению реки. Поэтому важно проводить мониторинг р. Сиухунь.

Речные отложения различаются по геохимическим параметрам, например по органике, распределению частиц, кислотности, минералогии, – всему, что влияет на мобильность и биодоступность ртути [12]. В данном исследовании осадочное органическое вещество (ОВ) и изотопы ($\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$) использованы в качестве маркера загрязнения окружающей среды, идентифицирующего источник ртути в речных отложениях. Ртуть сильно коррелирует с органическим веществом, что влияет на ее распределение по взвешенным веществам в толще воды и секвестрацию в отложениях [12]. Таким образом, источник ртути может быть представлен на основе осадочного ОВ. Стабильные изотопы в ОВ озерных отложений часто используются для отслеживания источников органики ввиду слабой подверженности изотопного состава осадочного органического вещества влиянию постфотосинтетических и диагенетических процессов [13]. С помощью модели изотопного смешивания можно определить источник ртути в смеси.

Полевой поиск проведен во влажный сезон для отслеживания и оценки состава ОВ осадочных пород и загрязнения ртутью (THg) в результате КМДЗ на водосборе р. Сиухунь в Индонезии. Во время влажного сезона сильные дожди вызывают повышение уровня воды в реках, сток почвы, вынос речных отложений, что приводит к повышению переноса отложений дальше по течению реки. Оценка биологического воздействия и экологического риска ртути для бентических организмов в речных отложениях р. Сиухунь проведены на основе руководящих принципов качества осадков (SQGV). Впервые были исследованы ртутное загрязнение речных отложений р. Сиухунь. Это первый аналитический отчет в Индонезии, ранее большинство публикаций было посвящено

* Mitigating Mercury Emission from Artisanal and Small Scale Gold Mining in Indonesia. Program Report, 2013. 39 p. URL: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/31242/MercE.pdf?sequence=1 (дата обращения 02.11.2023).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 272. С. 59-71
© Вилли К. Нуграха, Хуйхо Чон, Фан Динь Куан, Рэнди Новирса, Томохиро Коморита, Ясухиро Исибаси, Дзюн Кобаяси, Кодзи Аризоно, Асеп Баю Дани Нандиянто, 2025

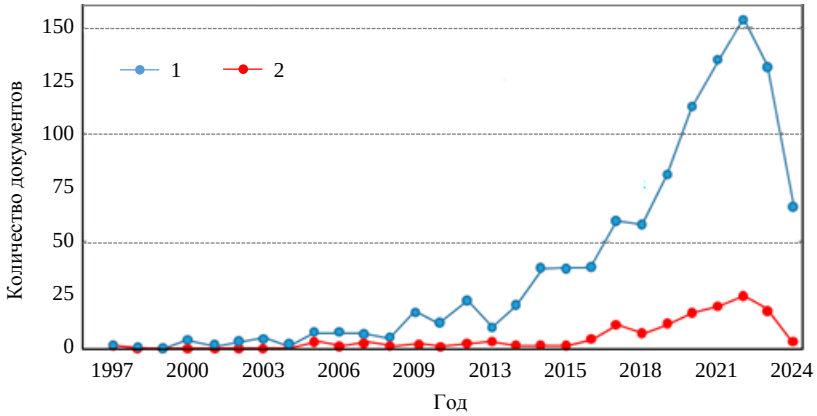


Рис.1. Библиографический анализ трендов в исследованиях по ключевым словам «кустарная мелкомасштабная добыча золота» (1) и «кустарная мелкомасштабная добыча золота в Индонезии» (2) [14]. Дата проведения – 25 июня 2024

только обнаружению тяжелых металлов в речной воде и отложениях, но глубокие исследования по изучению ртути не проводились. Библиографический анализ публикаций базы Scopus также показал, что только 136 публикаций в настоящее время посвящены КМДЗ в Индонезии (рис.1), что в несколько раз меньше публикаций про КМДЗ в общем (1024 документа). Это говорит о необходимости публикации отчетов о КМДЗ в Индонезии.

Факторы, подтверждающие новизну и важность исследования:

• оценка ртутного загрязнения двух очень важных для Индонезии рек Западной Явы – Сизимеута и Сиберанга и их притоков;

• подтверждение того, что источником ртути в реках может быть КМДЗ;

• оценка осадочного органического вещества на уровне отложений, которые были исследованы на основе ОВ в почвенном органическом веществе (ПОВ);

• использование стабильных изотопов углерода $\delta^{13}C$ и азота $\delta^{15}N$ для поиска источника ртути;

• оценка масштабов загрязнения речных отложений ртутью с помощью коэффициента риска;

• анализ и оценка потенциального влияния ртутного загрязнения на бентические организмы (биологические эффекты загрязнения).

Методы

Зона исследований. Исследование выполнено в водоразделе р. Сиухунь провинции Бантен, Индонезия. Зона отбора проб располагается в следующих координатах: 6°1'28.423"E – 6°34' 3.031"E и 106°10' 9.354"S – 106° 9'53.67"S (рис.2, *а*). На рис.2, *б* карта увеличена. В 2019 г. Агентство окружающей среды и лесного хозяйства провинции Бантен опубликовало данные о том, что р. Сиухунь

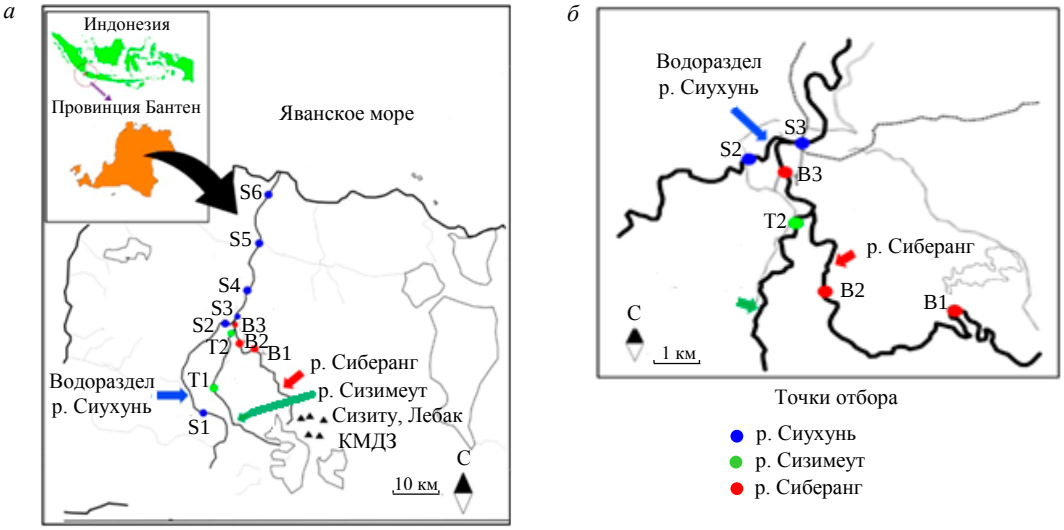


Рис.2. Места отбора проб речных отложений (*а*) и детализация участков отложений (*б*) по [15]

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

обладает двумя большими притоками: р. Сизимеут (458 км^2) и р. Сиберанг (305 км^2). Вода из этих двух рек используется для санитарных мероприятий и в сельским хозяйстве, поэтому данные исследования приобретают особую важность.

Эти притоки объединяются к югу от Рангкасбитунга, являющегося столицей провинции Бантен, и на севере впадают в Яванское море. Интересно, что верхние притоки берут свое начало в горах Каранг и Халимун [3], где жители верхней части водораздела р. Сиухунь занимаются фермерством и золотодобычей, например в районе Лебак [3, 16]. Местные жители извлекают золото с помощью ртути (амальгамация) в лесу, на реке и на своих участках.

Отбор проб. В январе 2021 г. (влажный сезон) пробы речных отложений (0-10 см) были взяты в 11 точках водораздела р. Сиухунь, включая два больших притока этой реки – Сизимеут и Сиберанг (рис.2, *а*). Шесть точек располагаются в главном русле от верхнего (S1), среднего (S2 и S3) и нижнего течения (S4, S5, S6). Две точки отбора проб вдоль р. Сизимеут – T1 и T2 и три – на р. Сиберанг (B1, B2, B3) (рис.2, *б*). Образцы отложений были собраны спустя один день после большого наводнения в водоразделе р. Сиухунь, которое могло изменить содержание ртути в отложениях [17].

Образцы были отобраны с помощью грейферного пробоотборника, трижды гомогенизировались, а затем сохранялись в прохладном боксе. В лаборатории пробы, доставленные для проведения анализа, просеивались через сито размером 150 мкм [18] и высушивались при комнатной температуре 20 °C. Высушенные образцы изучались с помощью прямого анализатора ртути.

Образцы поверхностных вод были отобраны с использованием горизонтального точечного анализатора, они исследовались согласно Индонезийскому национальному стандарту (SNI 6995:2021) для воды и сточных вод. Образцы поверхностных вод были пропущены через фильтры крупностью 0,45 мкм и собраны в полипропиленовую бутылку. Далее отфильтрованные образцы были подкислены с помощью азотной кислоты до pH < 2. Все бутылки сохранялись в контейнере со льдом в холодильной камере при температуре 4 °C до проведения анализа. Концентрация общей ртути в образце поверхностной воды была определена по методу холодного пара с использованием анализатора ртути.

Химическое и пробоподготовительное разложение. Для калибровки использовался высокочистый стандартный раствор ртути (1000 мг/л) производства Merck (Германия), Wako (Япония). Концентрация ртути в речных отложениях определена методом EPA 7473 с использованием термического сжигания совместно с атомно-абсорбционной спектрометрией (анализатор ртути MA 3000 NIC, Япония). Для определения характеристик отложений применялся элементный анализатор Thermo Fisher Scientific, ConFloIV, анализирующий общий органический углерод (TOC) и общий азот (TN).

Частичный органический фосфор (POP) определен путем вычитания суммы фракций неорганического фосфора из общего количества фосфора в отложениях после применения метода прокаливания [19]. Для изотопного анализа ($\delta^{13}C$ и $\delta^{15}N$) отобраны пробы поверхностных отложений. Образец отложений подкисляли в емкости с одноазотным раствором соляной кислоты на протяжении 24 ч для удаления карбонатов из матрицы отложений. Пробы промывались чистейшей водой и просушивались при температуре не менее 80 °C. Высушенные пробы перемалывались в мелкодисперсный порошок с использованием ступки и пестика.

Изотопный анализ выполнен с использованием элементного анализатора вкупе с масс-спектрометром изотопного отношения, согласно стандартам метода стабильных изотопов Pee Dee Belemnite для изотопов азота и углерода (Thermo Fisher Scientific, Flash 1112 Series, ConFloIV, DELTA Plus). Количество $\delta^{13}C$ и $\delta^{15}N$ сравнивалось с венскими стандартами Pee Dee Belemnite и азота воздуха [20]. Соотношения C:N, N:P и C:P определены на основе их молекулярных весов

$$\delta^{15}\mathrm{N} = \left\{\left(\frac{R_{\text{проба}}}{R_{\text{стандарт}}}\right) - 1\right\} \cdot 1000;$$

$$\delta^{13}\mathrm{C} = \left\{\left(\frac{R_{\text{проба}}}{R_{\text{стандарт}}}\right) - 1\right\} \cdot 1000,$$

где R – соотношения $^{13}C/^{12}C$ или $^{15}N/^{14}N$.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 272. С. 59-71
© Вилли К. Нуграха, Хуйхо Чон, Фан Динь Куан, Рэнди Новирса, Томохиро Коморита, Ясухиро Исибаси, Дзюн Кобаяси, Кодзи Аризоно, Асеп Баю Дани Нандиянто, 2025

Контроль и обеспечение качества. Для внутреннего контроля качества оценки достоверности данных использовался аттестованный стандартный образец (СО) морских отложений NMIJ 7302-a (Япония), а количество реплик СО и проб исследовались в дублетах и трипликатах. Согласно аналитическим параметрам, точность метода составила 101,28 %, повторяемость метода – 3,68 % от RSD, а предел обнаружения (3SD от холостой пробы) составил 20 нг/кг. Это свидетельствует об эффективности метода для определения количества ртути в отложениях.

Модель смешивания изотопов. Все исследования выполнены с использованием свободно распространяемой программы R версии 4.0.2. Пропорциональный вклад каждого конечного члена (т.е. ПОВ каждого притока) в поверхностные отложения оценен с использованием байесовской модели смешивания, согласно цепи Маркова метода Монте-Карло [21]. Анализы выполнены с применением пакета R «simmr», который является обновленной версией «siar». В качестве приоритетного распределения для этого анализа использовалось распределение Дирихле – обобщение распределения Бета [22]. Коэффициент трофического обогащения установлен равным нулю с учетом нетрофических отношений между участниками анализа. Были запущены четыре цепи Маркова длиной 10000000 проб, и первые 100000 проб образцов были отброшены при прогонке. Прореживание было скорректировано до 100 проб в зависимости от сходимости цепей. Полученные диагностические статистики Гельмана – Рубина были близки к 1 для всех оцениваемых параметров, что соответствовало правилам оценки сходимости (менее 1,1) [23].

Биологические эффекты. Согласно Руководству Австралийско-Новозеландского совета по окружающей среде и охране природы (ANZECC), для оценки биологического воздействия существует две рекомендуемых величины из руководящих принципов качества осадков (SQGV): низкие и средние значения эффективного диапазона (ЭДН и ЭДС соответственно), представляющие пороговый и вероятный уровни возникновения неблагоприятного эффекта, а также пороговый и вероятный уровень воздействия (ПУВ и ВУВ соответственно), отражающие высокую вероятность эффекта.

Для оценки уровня риска ртутного загрязнения отложений использован коэффициент риска как наиболее обоснованный метод оценки уровня загрязнения окружающей среды [24, 25]:

$$КР = \frac{ИКО}{ККО},$$

где ИКО – измеренная концентрация одного вещества в образце, мкг/кг; ККО – критерий качества отложений, нг/г.

Критерий качества отложений для ртути

$$ККО = К_р \cdot ККВ, \quad (1)$$

где $К_р$ – коэффициент разделения ртути между твердой фазой и интерстициальной водой, л/кг; ККВ – критерий качества воды.

Величина $К_р$ определяется по формуле

$$К_р = О_о(Hg)/О_в(Hg),$$

где $О_о$ (Hg) – количество ртути в образце донных отложений каждого участка, мкг/кг; $О_в$ (Hg) – количество в образце воды каждого участка, мкг/кг.

В данном исследовании концентрация растворенной ртути варьировала от значения н.о. (не обнаружена) до 46 нг/л со средним значением 14,2 нг/л. Коэффициенты разделения (log $К_р$) ртути между твердыми частицами и водой в водосборе р. Сиухунь составили 0-5,21 со средним значением 4,28, среднее значение $К_р$ – 19054 л/кг. ККВ получен на основе тканевого критерия (ТК) и коэффициента биоаккумуляции (КБА):

$$ККВ = \frac{ТК}{КБА}. \quad (2)$$

ТК получен на основе метода распределение видовой чувствительности. В данном исследовании значение ТК (HC5) равно 0,062 мг/кг на основе данных отчета [25]. Значение КБА составило

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Вилли К. Нугараха, Хуйхо Чон, Фан Динь Куан, Рэнди Новирса, Томохиро Коморита, Ясухиро Исибаси, Дзюн Кобаяси, Кодзи Аризоно, Асеп Баю Дани Нандиянто, 2025

3023 л/кг, согласно данным [4]. В результате вычислений по формуле (2) ККВ ртути в р. Сиухунь достиг 20,5 нг/л. С учетом среднего значения K_p (19,054 л/кг), ККО по ртути составил 390,80 нг/г, согласно формуле (1). Оценка экологического риска по ртути: при КР > 1 риск высок; 0,1 < КР < 1,0, риск умеренный; КР ≤ 0,1, экологический риск низкий [25].

Результаты и обсуждение

Распределение ртути в точках опробования. В табл.1 представлены концентрации общей ртути в главном потоке р. Сиухунь в пределах 0,02-0,91 мг/кг сухого веса со средними значениями 0,59±0,32 мг/кг. Детальный анализ табл.1 представлен на рис.3. В районе средних потоков (S2 и S3), концентрация общей ртути относительно высока, особенно в потоке S3, что может быть вызвано взаимодействием с его притоками р. Сизимеут (T1 и T2), р. Сиберанг (B1-B3) и главным потоком р. Сиухунь (S1-S6), где перенос ртути чрезвычайно высок – 0,42-0,83 мг/кг. Это говорит о том, что высокий уровень загрязнения ртутью может быть вызван КМДЗ вверх по течению этих притоков, как показано на рис.2, *а*. В доказательство этого проведено исследование почвы рисового поля в 500 м от места КМДЗ в Сизиту района Лебак, которое является источником загрязнения ртутью притоков р. Сизимеут. Из отчета [6] известно, что вода для ирригационной системы получена из загрязненной ртутью воды после процесса амальгамации. Концентрация ртути в почве рисового поля (n = 3) составляет 45,86±2,37 мг/кг сухого веса, это выше допустимого уровня, установленного Всемирной организацией здравоохранения (концентрация ртути в почве, используемой в сельском хозяйстве, должна составлять 0,05 мг/кг) [26].

Таблица 1

Характеристики отложений и концентрация общей ртути (сухой вес) в главном течении и притоках р. Сиухунь

Точки опробования	TOC*, мкмоль/г	TN*, мкмоль/г	POP*, мкмоль/г	C/N	A/POP	У/POP	$\delta^{13}C^*$, ‰	$\delta^{15}N^*$, ‰	Содержание общей ртути**, мг/кг
Главное русло									
S1	174±30	20±2	1,0±0,9	8,8	18,2	138	–25,1	1,4	0,02±0,01
S2	800±33	81±3	3±1	9,9	27,3	232	–26,0	2,9	0,62±0,04
S3	1174±110	110±2	6±2	10,7	18,5	170	–25,9	3,1	0,65±0,05
S4	958±370	94±37	6,0±0,8	10,2	15,3	134	–25,8	2,5	0,91±0,04
S5	707±190	74±8	5,0±7	9,7	13,8	114	–25,7	2,6	0,86±0,06
S6	357±150	38±12	4,0±0,1	9,3	9,8	78,8	–25,5	2,7	0,46±0,04
Min	174	20,0	1,0	8,8	9,8	78,8	–26,0	1,4	0,02
Max	1174	110,0	6,0	10,7	27,3	232,0	–25,1	3,1	0,91
Средняя	695,0	69,5	4,2	9,8	17,1	144,5	–25,7	2,6	0,59
SD	372,9	34,2	1,9	0,7	5,9	52,4	0,3	0,6	0,32
Р. Сизимеут									
T1	192±10	16±1	3±0,1	11,6	5,9	58	–26,2	2,0	0,62±0,04
T2	405±30	45±5	3±0,2	9,1	14,6	113	–25,3	3,2	0,52±0,04
Min	192	16	3	9,1	5,9	58	–26,2	2,0	0,52
Max	405	45	3	11,6	14,6	113	–25,3	3,2	0,62
Средняя	298,5	30,5	3,0	10,4	10,2	85,5	–25,7	2,6	0,57
Р. Сиберанг									
B1	320±30	33±4	4±0,1	9,8	7,8	65,4	–25,7	3,5	0,77±0,04
B2	397±63	44±3	4±0,8	9,1	12,0	94,3	–25,2	3,1	0,83±0,09
B3	281±21	28±1	3±0,8	10,0	10,4	89,3	–26,1	2,4	0,42±0,05
Min	281	28	3,0	9,1	7,8	65,4	–26,1	2,4	0,42
Max	397	44	4,0	10,0	12,0	94,3	–25,2	3,5	0,83
Средняя	332,7	35,0	3,7	9,6	10,1	83,0	–25,7	2,0	0,67
SD	59,0	8,2	0,6	0,5	2,1	15,5	0,5	0,5	0,22

* Количество проб (n = 3); ** (n = 2).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 272. С. 59-71
© Вилли К. Нуграха, Хуйхо Чон, Фан Динь Куан, Рэнди Новирса, Томохиро Коморита, Ясухиро Исибаси, Дзюн Кобаяси, Кодзи Аризоно, Асеп Баю Дани Нандиянто, 2025

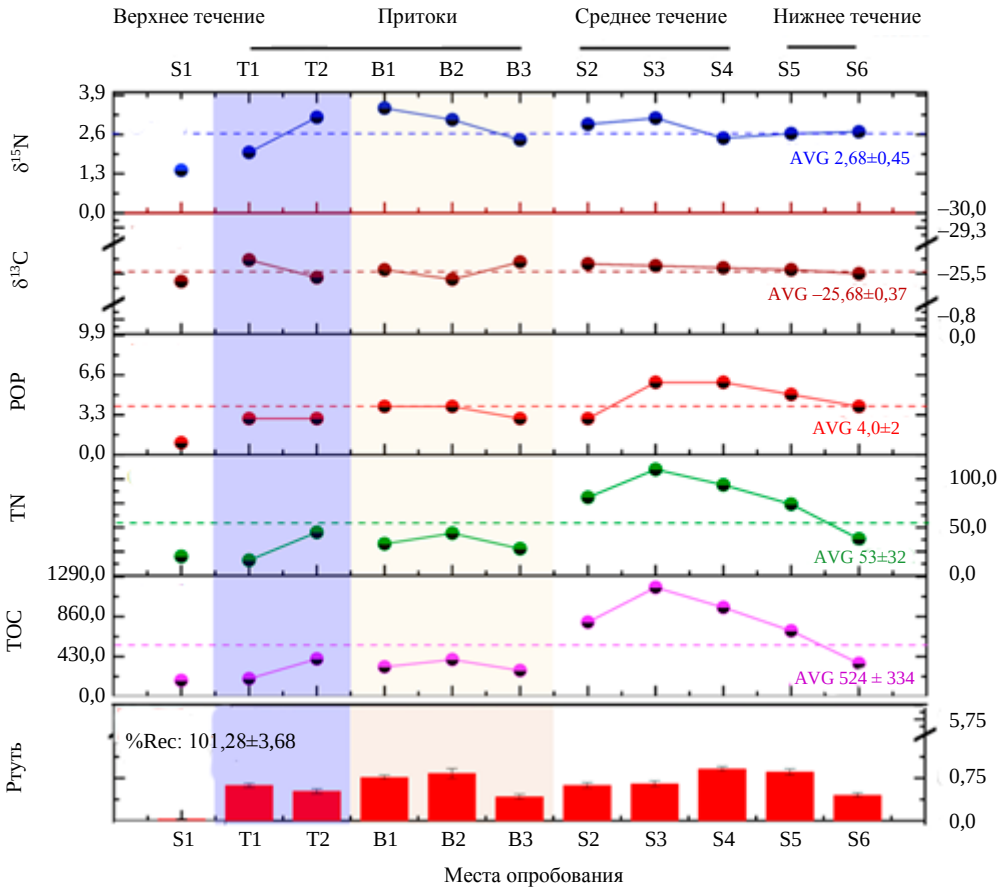


Рис.3. Распределения значений $\delta^{13}C$ и $\delta^{15}N$ (‰), органического вещества, концентрации общей ртути (мкмоль·г $^{-1}$) в каждом участке реки

Ртуть при попадании в почву может прочно связаться с ПОВ. Во время влажных сезонов зараженная почва, вымываясь, попадает в реку и накапливается в речных отложениях. Наиболее высокая концентрация ртути установлена в точках S4 (0,91 мг/кг) и S5 (0,84 мг/кг), расположенных ниже по течению р. Сиухунь. Высокая концентрация ртути в данных точках отбора может быть обусловлена тем, что это наиболее глубокие места р. Сиухунь, глубина их составляет 6,72 и 4,22 м соответственно. Большая глубина, в свою очередь, приводит к осаждению большего количества взвешенных частиц в период слабого стока.

Накопление ртути в главном русле и притоках представляло серьезную опасность, когда концентрация общей ртути превышала допустимые значения (0,15 мг/кг), установленную Временным руководством по качеству донных отложений Австралийско-Новозеландского совета по окружающей среде и охране природы (ANZECC ISQG) и Гонконгским временным руководством по качеству донных отложений (Hongkong ISQG), за исключением S1 (верхнее течение) [27]. Значения показателей качества осадков – уровень возникновения неблагоприятного эффекта (ЭДН – 0,15; ЭДС – 0,70 мг/кг), уровень воздействия (ПУВ – 0,13; ВУВ – 0,70 мг/кг). Информация о качестве донных отложений от правительства Индонезии в настоящее время недоступна. Таким образом, отложения в основном течении и притоках составляют высокий потенциальный экологический риск из-за загрязнения ртутью, особенно для водных организмов.

Сравнение средних значений ртути по всему миру. По сравнению с другими индонезийскими реками данные о р. Сиухунь ограничены. Результаты исследования рек в других странах, опубликованные ранее, представлены к сравнению в табл.2 [28-31]. Концентрация общей ртути в р. Сиухунь выше по сравнению с незагрязненными областями, такими как, например, болото Янгсури (Корея). Она примерно сопоставима с концентрацией в заливе Чиаджоу (Китай), но ниже, чем в других зонах загрязнения, включая залив Минамата (Япония) и р. Хунза (Пакистан). Содержание общей ртути в р. Сиухунь и ее притоках указывает на умеренное загрязнение ртутью.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Вилли К. Нугараха, Хуйхо Чон, Фан Динь Куан, Рэнди Новирса, Томохиро Коморита, Ясухиро Исибаси, Дзюн Кобаяси, Кодзи Аризоно, Асеп Баю Дани Нандиянто, 2025

Таблица 2

Сравнение концентраций общей ртути в поверхностных отложениях в бассейнах различных стран

Бассейн	Источник ртути	Содержание общей ртути, мг/кг	Ссылка на источник
Болото Янгсури, Корея	Болото	0,001-0,086	[28, 30]
Залив Минамата, Япония	Промышленность	0,1-3,34	[29, 31]
Залив Чиаджоу, Китай	Промышленность	0,12-0,58	[30, 32]
Р. Хунза, Пакистан	КМДЗ	0,22-6,40	[31, 33]
Р. Сиухунь, Индонезия	КМДЗ	0,02-0,91	Данное исследование

Характеристики ОВ (TOC, TN и POP) в отложениях. Концентрации TOC, TN и POP являются ключевыми параметрами при описании и определении количества органических веществ в отложениях [32]. Распределение TOC, TN и POP в отложениях р. Сиухунь (S1-S6) примерно одинаковы. Их повышение зафиксировано на участке между верхним и средним течением, но они уменьшаются на участках ниже по течению (см. рис.3). Определенные концентрации: S3 (TOC – 1174, TN – 110, POP – 6 мкмоль/г); S4 (TOC – 958, TN – 94, POP – 5 мкмоль/г) и S5 (TOC – 707, TN – 74, POP – 5 мкмоль/г); средние концентрации TOC, TN и POP составили 695; 69,5; 4,17 мкмоль/г соответственно.

Высокие концентрации TOC, TN и POP найдены в точке S3, причиной которых могут быть высокий уровень поступления ОВ с суши, а также влияние на состав ОВ в отложениях сильных дождей [33]. Средняя концентрация TOC, TN и POP составила 298,5; 30,50; 3,00 мкмоль/г соответственно в р. Сизимеут и 332,67; 35,00; 3,67 мкмоль/г соответственно в р. Сиберанг. Различные концентрации TOC, TN и POP в этих притоках указывают на различия в происхождении этих соединений в реках. В других отчетах, аналогичных данному исследованию [34], указывается, что концентрации TOC, TN и POP в отложениях субводораздела р. Мяньцзян значительно различаются.

Корреляция между показателями содержания ртути, TOC, TN и POP и их молярные соотношения. Корреляционный анализ Пирсона проведен для показателей концентрации ртути, углерода, азота, фосфора, а также их молярных соотношений и изотопов (табл.3). Количество TOC положительно коррелирует с TN, POP, отношениями углерода к азоту, азота к POP и углерода в POP, а также с изотопом $\delta^{15}N$ и ртутью. Сильная корреляция обнаружена между количеством TOC и TN в отложениях р. Сиухунь и ее притоков (r = 1,00; P < 0,01), что говорит о том, что большая часть TN связана с TOC, который можно рассматривать как органический азот [35]. Более того, сильно коррелируют между собой TOC и POP (r = 0,78; P < 0,05).

Таблица 3

Корреляционная матрица Пирсона для ртути, $\delta^{15}N$, $\delta^{13}C$, TOC, TN, POP и их молярного соотношения в р. Сиухунь и ее притоках

Элементы	TOC	TN	POP	C/N	N/POP	C/POP	$\delta^{13}C$	$\delta^{15}N$
TOC								
TN	1,0**							
POP	0,78**	0,77**						
C/N	0,27	0,20	0,35					
N/POP	0,57	0,60	–0,04	–0,21				
C/POP	0,66*	0,68*	0,07	–0,06	0,99**			
$\delta^{13}C$	–0,28	–0,22	–0,29	–0,87	0,06	–0,08		
$\delta^{15}N$	0,37	0,40	0,51	–0,05	0,03	0,06	–0,03	
Ртуть	0,51	0,52	0,79**	0,33	–0,14	–0,06	–0,30	0,61

*p < 0,05; **p < 0,01.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Результаты показывают, что типы ОВ должны быть сходными на всех участках опробования. Исходя из этого, можно предположить, что накопление ртути в отложениях может быть представлено ОВ. Результаты данного исследования согласуются с результатами проведенных ранее исследований [36], которые показали, что концентрация ртути сильно коррелирует с содержанием TOC в заливе Бохай (Северный Китай) и р. Хайхэ в Тяньцзине, что вызвано термически лабильной фракцией ОВ, высвобождающейся в результате пиролиза при температуре 300 °C. Определено, что сильная корреляция между концентрациями TOC, TN, POP и ртутью указывает на сильную корреляцию между адсорбцией ОВ и ртути в отложениях.

Определение типа ОВ. Органические вещества в отложениях основного потока р. Сиухунь и притоков проанализированы для определения источника ртути (см. табл.1). Молярное соотношение и соотношение стабильных изотопов органических углерода и азота использованы для определения происхождения и трансформации ОВ под влиянием антропогенного воздействия на местные и региональные экосистемы [32]. Анализ соотношения углерода к азоту вместе с изотопами $\delta^{13}C$ и $\delta^{15}N$ даст сведения об источниках ОВ и поможет определить их тип. Узкий диапазон (от −26,2 до −25,1 ‰) изотопа $\delta^{13}C$ в отложениях р. Сиухунь и ее притоков объясняется преобладанием в этой зоне условий повышенной гидродинамической энергии [36].

Данное исследование выполнено во время влажного сезона, т.е. течение реки было сильным, и ожидалось, что распределение частиц ОВ будет значительно зависеть от течения. Поэтому сделано предположение, что во время влажного сезона ОВ из верхнего течения этих притоков могут быть перенесены в основное течение. Для определения типа ОВ выполнена оценка изотопов $\delta^{13}C$ и $\delta^{15}N$ (рис.4, *а*).

Результаты не позволили провести различие между типами ОВ на основе некоторых значений, полученных из фитопланктона и ОВ в почве. Однако, как и предполагалось, по соотношению углерода и азота со значениям $\delta^{13}C$ среднее значение $\delta^{13}C$ указывало на большое количество ОВ, полученного из почвы, что согласуется с почвенными свойствами ОВ (рис.4, *б*) [37]. Определено, что ОВ в отложениях р. Сиухунь и ее притоков не генерируется фитопланктоном, этот результат согласуется с данными другого источника [38].

Модель смешивания стабильных изотопов. Байесовская модель смешивания изотопов применялась для оценки пропорционального вклада каждого ОВ в отложения на каждом участке с использованием стабильного изотопа из трех источников: S1 – незагрязненный приток выше по течению от основного русла, T1 – загрязненный приток (р. Сизимеут), B1 + B2 – загрязненный приток (р. Сиберанг). В данном случае точки опробования B1 + B2 выступают как одна группа, поскольку эти участки имеют схожие изотопные и геологические характеристики.

В данном исследовании доля вклада $n + 1$ различных источников может быть определена с помощью разных изотопных трассеров на основе сохранения массы стабильного изотопа. Исходя из графика $\delta^{15}N$ и $\delta^{13}C$ (рис.5), ОВ, которые накапливаются в отложениях р. Сиухунь (смеси S4, S5 и S6), имели сходные характеристики с ОВ, которые были получены из смеси T2 и B3; эти точки находились относительно близко к источнику (T1, B1 + B2). В случае с точками S3 и B2, которые выходят за пределы треугольника, использован пакет «siar», основанный на симуляции полигонов смешивания Монте-Карло, чтобы применить предположение «точка в полигоне» к этим моделям [22].

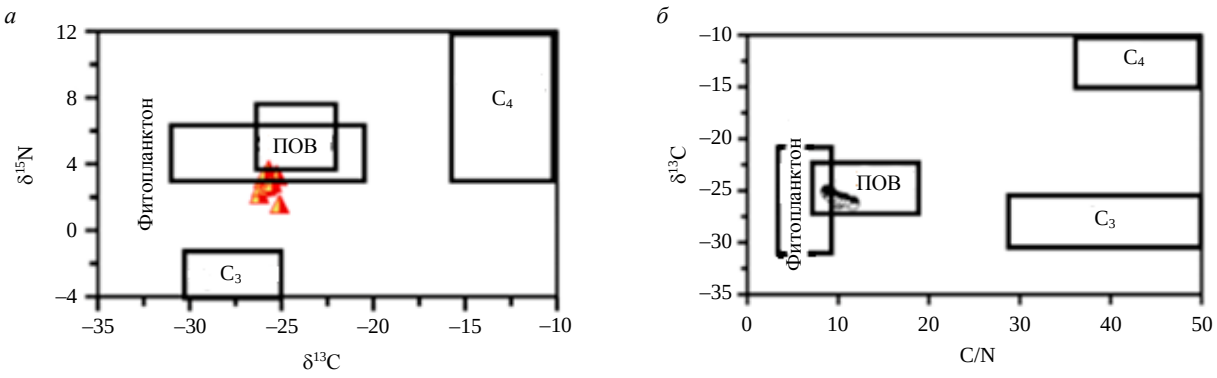


Рис.4. Зависимость изотопов $\delta^{13}C$ от $\delta^{15}N$ (*а*) и соотношение углерода к азоту в зависимости от $\delta^{13}C$ (*б*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Вилли К. Нугараха, Хуйхо Чон, Фан Динь Куан, Рэнди Новирса, Томохиро Коморита, Ясухиро Исибаси, Дзюн Кобаяси, Кодзи Аризоно, Асеп Баю Дани Нандиянто, 2025

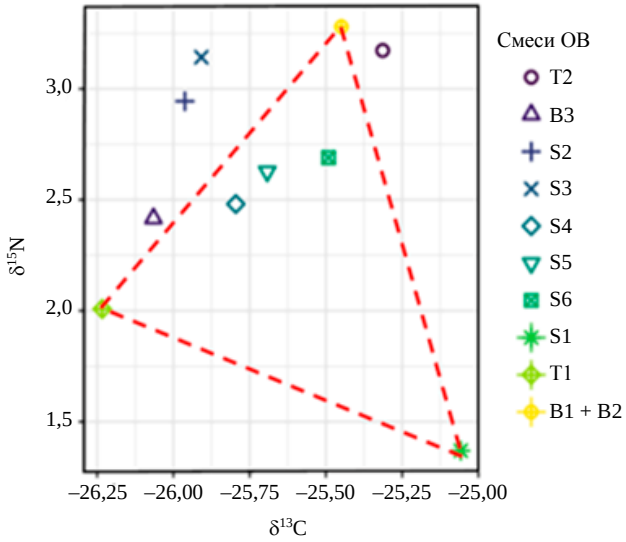


Рис.5. Байесовская модель смешивания изотопов

Полигоны смешивания (т.е. модель смешивания) представлены с использованием распределений предполагаемых источников ОВ. Рассчитывалась доля источников, имеющих ключевое влияние. Эта доля может быть представлена как частотная вероятность того, что предложенная модель смешивания дает возможность вычислить вклад источника в расчете изотопных сигнатур. Поскольку вычисление линейного влияния не проводилось, можно рассчитать вклад внешней части многоугольника.

Вклад почвенных ОВ (среднее из реки ± SD) р. Сизимеут (T1) обнаружен в большинстве отложений точек S3-S6, где самым высоким был вклад S4 (60,79±0,05 %), затем S5 (49,32±0,07 %), S3 (39,00±0,0 %) и S6 (23,83±0,09 %). ОВ р. Сибераng появляются в отложениях нижних течений S3-S6 с наибольшим вкладом следующих точек: S6 (47,51±0,01 %), S5 (36,29±0,01 %) и S4 (26,00±0,01 %). Определено, что почвенные ОВ из р. Сиухунь и р. Сибераng, которые загрязнены ртутью, внесли вклад в накопление ртути в отложениях зоны нижних течений р. Сиухунь из-за образования сильных ионных связей между ртутью и ПОВ, повлиявший на секвестрацию ртути в отложения [39]. Исходя из этого можно предположить, что ОВ отложений в нижнем течении поступают преимущественно из этих притоков.

Биологический эффект. Загрязненные ртутью речные отложения оказывают эффект на бентические организмы. Поэтому для экотоксикологической оценки концентрации ртути в отложениях использовались показатели ЭДН/ЭДС и ПУВ/ВУВ. В связи с тем, что значения ЭДН и ПУВ оказались ниже ожидаемых, чтобы оказать неблагоприятное воздействие на обитающие в отложениях организмы, биологический эффект оценивался по значениям ЭДС и ВУВ, указывающим на концентрацию химических веществ, выше которой возможно неблагоприятное воздействие в водной экосистеме [40]. Данные значения представляют собой надежный инструмент для оценки качества отложений и неблагоприятного биологического воздействия на эстуарные отложения [41].

По данным в табл.1, концентрации ртути во всех зонах опробования, за исключением S1, превысили показатели ЭДН и ПУВ. Некоторые зоны опробования показали чрезвычайно высокие концентрации ртути, превышающие значения ЭДС и ВУВ, установленные в нижних течениях S4 и S5, а также в притоках B1 и B2. Таким образом, эти зоны могут классифицироваться как потенциально токсичные для бентических организмов. Влияние от загрязнения отложений ртутью на водную экосистему вероятно вызван процессами ремобилизации и ресуспендирования [40].

Данные о токсичности ртути, включая аномальные и деформированные ткани водных организмов, в соответствии со значениями концентрации отсутствия наблюдаемого эффекта (NOEC) и наименьшей концентрацией наблюдаемого эффекта (LOEC), представлены в отчетах [26] для некоторых бентических организмов – моллюсков, ракообразных, водных насекомых и рыб. Деформация роста водных организмов была обнаружена у моллюсков (*Pyganodon grandis*, Hg = 0,686 мг/кг) и рыб (*Perca flavescens*, Hg = 0,125 мг/кг; *Sandae vitreus*, Hg = 0,25 мг/кг); отклонения в клеточной системе было обнаружено у рыб (*Liza aurata*; Hg = 0,1 мг/кг; *Bileophtalmus dussumieri*, Hg = 0,59 мг/кг); расстройства биохимии найдены у рыб (*Ameiurus males*, Hg = 0,59 мг/кг; *Brycon amazonicus*, Hg = 0,63 мг/кг), ракообразных (*Dapnia magna*, Hg = 0,859 мг/кг), водных насекомых (*Hexagenia sp.*, Hg = 0,166 мг/кг), эффект серности установлен у моллюсков (*Mytillus edulis*, Hg = 1,12 мг/кг), рыб (*Poecilia reticulate*, Hg = 0,2 мг/кг; *Onchorhynchus keta*, Hg = 0,8 мг/кг). В предыдущих исследованиях [3] был представлен коэффициент биоаккумуляции отдельных видов рыб – *Barbonymus gonionotus* и *Channa striata*, в р. Сиухунь он превысил 1000, что соответствует результатам опасной категории в случае употребления. Согласно другим исследованиям [7], концентрация ртути в прудах Сизиту варьируется от 0,1 до 1,3 мг/кг, что превышает допустимое количество для потребления человеком.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В данном исследовании экологический риск токсичности ртути на основе КР в 11 точках отбора проб речных отложений на р. Сиухунь показал, что значения КР в 10 точках, включая основное течение и притоки, превышают 1, в то время как КР в S1 менее 0,1. Значения КР по ртути в точках опробования – главного течения: S1 – 0,05; S2 – 1,59; S3 – 1,66; S4 – 2,33; S5 – 2,20; S6 – 1,18; притока (р. Сизимеут): T1 – 1,59; T2 – 1,33; притока (р. Сиберанг): B1 – 1,97; B2 – 2,12; B3 – 1,07.

Аналогичный результат был получен в отчете [25] по озеру Тайху, где почти весь диапазон значений КР в 31 точке опробования находился в пределах 0,10-1,00, а в двух точках был выше 1 – S12 (КР = 2,04) и S13 (КР = 2,18). Исходя из этого, экологический риск для озера Тайху оценивается как средний уровень.

Результаты данного исследования показали, что значения КР в р. Сиухунь довольно высоки по сравнению с озером Тайху, что свидетельствует о высоком уровне экологического риска по показателю ртути в речных отложениях. Это означает, что загрязнение ртутью потенциально влияет на бентические организмы, являющиеся звеньями пищевой цепи в большинстве места отбора проб, кроме S1. В будущем необходимо изучить виды рыб и бентических организмов в места отбора проб р. Сиухунь.

Ограничения данного исследования:

• Реки Индонезии находятся в ведении местных органов власти. Для отбора проб из этих рек частные лица или организации должны получить специальное разрешение местных органов власти.

• Местные власти отвечают за мониторинг и надзор за реками и определяют точки отбора проб; частные лица или организации должны придерживаться установленных местными властями процедур.

• Затрудненный доступ к рекам, которые окружены густыми лесами. Вынужденное следование процедуре, установленной местными властями, что может ограничить временно́е и пространственное представление собранных данных.

• Для надежного выявления пространственных закономерностей и корреляций с другими геохимическими характеристиками обычно требуется больший набор данных (не менее 30 образцов), тем самым обеспечивается статистическая значимость и уменьшается влияние выбросов.

• Малое количество проб (11 проб) недостаточно точно отражает геохимическое разнообразие и не учитывает влияние экологических факторов, таких как растительный покров, землепользование и деятельность человека. Также не учитываются временные колебания уровней ртути, связанные с сезонными изменениями, такими как изменение скорости течения воды, осадки и эрозия. Таким образом, в исследовании не обеспечен достаточный географический охват, и существует риск упустить значительные вариации ртутного загрязнения в пределах речной системы. Поэтому необходимо провести дополнительные исследования с достаточным географическим охватом для получения комплексного результата.

• Кроме КМДЗ необходимо учитывать и другие потенциальные источники загрязнения ртутью, так какие промышленные сбросы, атмосферные осадки и историческое загрязнение. Понимание относительного вклада этих источников требует комплексной стратегии отбора проб.

Заключение

Средняя концентрация обшей ртути в отложениях р. Сиухунь колеблется в пределах 0,02-0,91 мг/кг сухого веса. Концентрация ртути в отложениях на поверхности превышала нормальное предельное значение во всех местах отбора проб, кроме S1 (согласно руководству по качеству отложений ANZECC). Данное исследование имеет важное значение, поскольку в нем впервые представлено описание загрязнения ртутью основного течения р. Сиухунь провинции Бантен в результате незаконной КМДЗ.

Это исследование подтвердило наличие загрязнения ртутью в водоразделе р. Сиухунь, где средняя общая концентрация ртути в поверхностных отложениях колеблется в пределах 0,02-0,91 мг/кг сухой массы и (на основании рекомендаций по качеству отложений) превышает нормальное предельное значение во всех местах отбора проб, за исключением S1. Байесовская модель смешивания с использованием изотопов показывает, что доля распределения ПОВ в главном течении р. Сиухунь составляет 23,8-60,8 % от доли в р. Сизимеут и 26,0-47,51 % от р. Сиберанг. Результаты корреляционного анализа Пирсона – анализа отношений углерода к азоту и $\delta^{13}C$ – показали, что ОВ в отложениях состоят из ПОВ, где концентрации общей ртути, углерода, азота и фосфора

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

сильно коррелируют между собой. Это свидетельствует о том, что приток вносит свой вклад в загрязнение ртутью основного течения р. Сиухунь из-за незаконной КМДЗ, которую ведут выше по течению притоков, что действует как точечные источники.

Биологические эффекты, оцененные с помощью ЭДС и ВУВ, показали, что концентрация ртути превышала нормальное предельное значение с умеренным уровнем коэффициента риска, что подтверждают высокую вероятность воздействия повышенного содержания ртути в отложениях в р. Сиухунь на жителей. Данное исследование имеет важное значение, поскольку в нем рассмотрена проблема загрязнения окружающей среды ртутью и представлены предложения по экологическому управлению ртутным загрязнением и восстановлению речных отложений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mulyaningsih Th.R., Alfian, Sutisna.* Distribution of heavy metals in sediments of the Ciujung watersheds Banten // Journal of Nuclear Reactor Technology. 2012. Vol. 14. № 3. P. 157-169 (in Indonesian).
2. *Akbari T., Pangesti F.S.P.* Water Quality Index of Cisadane River and Ciujung River // Advances in Social Science, Education and Humanities Research: Proceedings of the 1st International Multidisciplinary Conference on Education, Technology, and Engineering, 5-6 November 2019, Serang Banten, Indonesia. Atlantis Press, 2019. Vol. 410. P. 131-134. DOI: 10.2991/assehr.k.200303.032
3. *Prilia D., Qginawati K., Ariesyady H.D.* Analysis of Mercury in Water and Sediment Distribution and Its Bioaccumulation Potential in Fish in the Small Scale Gold Mining Area (Case Study: Ciberang River, Lebak, Banten) // Journal of Water Sustainability. 2013. Vol. 3. Iss. 2. P. 107-116. DOI: 10.11912/jws.3.2.107-116
4. *Libassi M.* Indonesia: Adaptation and Differentiation in Informal Gold Mining // Global Gold Production Touching Ground. Cham, 2020. P. 321-338. DOI: 10.1007/978-3-030-38486-9_17
5. *Getriana A., Achmadi U.F., Leometa C.H.* Behavioral Mercury Exposure of People in Artisanal and Small-Scale Gold Mining Site Area at Lebaksitu Village, 2017 // Indian Journal of Public Health Research & Development. 2018. Vol. 9. № 6. P. 432-438. DOI: 10.5958/0976-5506.2018.00593.4
6. *Novirsa R., Dinh Q.P., Jeong H. et al.* The dietary intake of mercury from rice and human health risk in artisanal small-scale gold mining area, Indonesia // Fundamental Toxicological Sciences. 2020. Vol. 7. Iss. 5. P. 215-225. DOI: 10.2131/fts.7.215
7. *Bose-O'Reilly S., Schierl R., Nowak D. et al.* A preliminary study on health effects in villagers exposed to mercury in a small-scale artisanal gold mining area in Indonesia // Environmental research. 2016. Vol. 149. P. 274-281. DOI: 10.1016/j.envres.2016.04.007
8. *Hong Y.-S., Kim Y.-M., Lee K.-E.* Methylmercury Exposure and Health Effects // Journal of Preventive Medicine and Public Health. 2012. Vol. 45. Iss. 6. P. 353-363. DOI: 10.3961/jpmph.2012.45.6.353
9. *Kim T.-H., Cho M.-J., Lee Y. et al.* Methylmercury Determination in Fish by Direct Mercury Analyzer // Journal of AOAC INTERNATIONAL. 2020. Vol. 103. Iss. 1. P. 244-249. DOI: 10.5740/jaoacint.18-0254
10. *Gutiérrez-Mosquera H., Marrugo-Negrete J., Díez S. et al.* Distribution of chemical forms of mercury in sediments from abandoned ponds created during former gold mining operations in Colombia // Chemosphere. 2020. Vol. 258. № 127319. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127319
11. *Palacios-Torres Y., Caballero-Gallardo K., Olivero-Verbel J.* Mercury pollution by gold mining in a global biodiversity hotspot, the Choco biogeographic region, Colombia // Chemosphere. 2018. Vol. 193. P. 421-430. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.10.160
12. *Chakraborty P., Sarkar A., Vudamala K. et al.* Organic matter – A key factor in controlling mercury distribution in estuarine sediment // Marine Chemistry. 2015. Vol. 173. P. 302-309. DOI: 10.1016/j.marchem.2014.10.005
13. *Ankit Y., Muneer W., Gaye B. et al.* Apportioning sedimentary organic matter sources and its degradation state: Inferences based on aliphatic hydrocarbons, amino acids and $\delta^{15}N$ // Environmental Research. 2022. Vol. 205. № 112409. DOI: 10.1016/j.envres.2021.112409
14. *Al Husaeni D.F., Nandiyanto A.B.D.* Bibliometric Using Vosviewer with Publish or Perish (using Google Scholar data): From Step-by-step Processing for Users to the Practical Examples in the Analysis of Digital Learning Articles in Pre and Post Covid-19 Pandemic // ASEAN Journal of Science and Engineering. 2022. Vol. 2. № 1. P. 19-46. DOI: 10.17509/ajse.v2i1.37368
15. *Willy Cahya Nugraha, Yasuhiro Ishibashi, Koji Arizono*. Assessment of heavy metal distribution and contamination in the sediment of the Ciujung Watershed, Banten Province, Indonesia // Journal of Material Cycles and Waste Management. 2023. Vol. 25. P. 2619-2631. DOI: 10.1007/s10163-023-01661-4
16. *Haq A., Achmadi U.F., Mallongi A.* Environmental Health Risk Assessment Due to Exposure to Mercury in Artisanal and Small-Scale Gold Mining Area of Lebak District // Global Journal of Health Science. 2018. Vol. 10. № 3. P. 125-131. DOI: 10.5539/gjhs.v10n3p125
17. *Ali M.M., Ali M.L., Islam Md. S., Rahman Md. Z.* Preliminary assessment of heavy metals in water and sediment of Karnaphuli River, Bangladesh // Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. 2016. Vol. 5. P. 27-35. DOI: 10.1016/j.enmm.2016.01.002
18. *Haiyan Li, Anbang Shi, Xiaoran Zhang.* Particle size distribution and characteristics of heavy metals in road-deposited sediments from Beijing Olympic Park // Journal of Environmental Sciences. 2015. Vol. 32. P. 228-237. DOI: 10.1016/j.jes.2014.11.014
19. *Rippey B., Campbell J., McElarney Y. et al.* Timescale of reduction of long-term phosphorus release from sediment in lakes // Water Research. Vol. 200. № 117283. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117283
20. *Berke M.A.* Reconstructing Terrestrial Paleoenvironments Using Sedimentary Organic Biomarkers // Methods in Paleoecology. Springer, 2018. P. 121-149. DOI: 10.1007/978-3-319-94265-0_8
21. *Mihailescu M.-D.* Bayesian analysis on mixture models, for understanding the process of myosin binding to the thin filament: A thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy. Essex: University of Essex, 2021. 180 p.
22. *Torres-Martínez J.A., Mora A., Knappett P.S.K. et al.* Tracking nitrate and sulfate sources in groundwater of an urbanized valley using a multi-tracer approach combined with a Bayesian isotope mixing model // Water Research. 2020. Vol. 182. № 115962. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115962
23. *Stock B.C., Jackson A.L., Ward E.J. et al.* Analyzing mixing systems using a new generation of Bayesian tracer mixing models // PeerJ. 2018. Vol. 6. № e5096. DOI: 10.7717/peerj.5096

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

24. *Meng Du, Dongbin Wei, Zhuowei Tan et al.* Predicted no-effect concentrations for mercury species and ecological risk assessment for mercury pollution in aquatic environment // Journal of Environmental Sciences. 2015. Vol. 28. P. 74-80. DOI: 10.1016/j.jes.2014.06.042

25. *Hailei Su, Di Shi, Jiwei Yang et al.* Distribution Characteristics and Risk Assessment of Mercury in Sediments From Taihu Lake // Frontiers in Environmental Science. 2021. Vol. 9. № 695470. DOI: 10.3389/fenvs.2021.695470

26. *Novirsa R., Quang P.D., Jeong H. et al.* The evaluation of mercury contamination in upland rice paddy field around artisanal small-scale gold mining area, Lebaksitu, Indonesia // Journal of Environment and Safety. 2019. Vol. 10. № 2. P. 119-125. DOI: 10.11162/daikankyo.E19RP0103

27. *Karaouzas I., Kapetanaki N., Mentzafou A. et al.* Heavy metal contamination status in Greek surface waters: A review with application and evaluation of pollution indices // Chemosphere. 2021. Vol. 263. № 128192. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128192

28. *Chun Liu, Dong Wang, FeiFei Dong et al.* Modeling organic matter sources of sediment fluxes in eroding landscapes: Review, key challenges, and new perspectives // Geoderma. 2021. Vol. 383. № 11470. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114704

29. *Balogh S.J., Tsui M.T.-K., Blum J.D. et al.* Tracking the Fate of Mercury in the Fish and Bottom Sediments of Minamata Bay, Japan, Using Stable Mercury Isotopes // Environmental Science & Technology. 2015. Vol. 49. Iss. 9. P. 5399-5406. DOI: 10.1021/acs.est.5b00631

30. *Yichen Lin, Fanping Meng, Yongxiang Du, Yuhan Tan.* Distribution, speciation, and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Jiaozhou Bay, China // Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. 2016. Vol. 22. Iss. 5. P. 1253-1267. DOI: 10.1080/10807039.2016.1159503

31. *Riaz A., Khan S., Muhammad S., Shah M.T.* Mercury Contamination in Water and Sediments and the Associated Health Risk: A Case Study of Artisanal Gold-mining // Mine Water and the Environment. 2019. Vol. 38. Iss. 4. P. 847-854. DOI: 10.1007/s10230-019-00613-5

32. *de la Lanza Espino G., Soto L.A.* C:N:P Molar Ratios, Sources and ^{14}C Dating of Surficial Sediments from the NW Slope of Cuba // PLoS One. 2015. Vol. 10. № 6. № e0125562. DOI: 10.1371/journal.pone.0125562

33. *Kobayashi S., Fujiwara T.* Influences of Terrestrial Inputs of Organic Matter on Coastal Water and Bottom Sediments in the Seto Inland Sea, Japan // Journal of Water and Environment Technology. 2018. Vol. 16. № 3. P. 138-148. DOI: 10.2965/jwet.17-035

34. *Hongmeng Ye, Hao Yang, Nian Han et al.* Risk Assessment Based on Nitrogen and Phosphorus Forms in Watershed Sediments: A Case Study of the Upper Reaches of the Minjiang Watershed // Sustainability. 2019. Vol. 11. Iss. 20. № 5565. DOI: 10.3390/su11205565

35. *Chakraborty P., Sarkar A., Vudamala K. et al.* Organic matter – A key factor in controlling mercury distribution in estuarine sediment // Marine Chemistry. 2015. Vol. 173. P. 302-309. DOI: 10.1016/j.marchem.2014.10.005

36. *Conghui Sun, Qi Wei, Lixia Ma et al.* Trace metal pollution and carbon and nitrogen isotope tracing through the Yongdingxin River estuary in Bohai Bay, Northern China // Marine Pollution Bulletin. 2017. Vol. 115. Iss. 1-2. P. 451-458. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2016.10.066

37. *Bakshi M., Ghosh S., Chakraborty D. et al.* Assessment of potentially toxic metal (PTM) pollution in mangrove habitats using biochemical markers: A case study on Avicennia officinalis L. in and around Sundarban, India // Marine Pollution Bulletin. 2018. Vol. 133. P. 157-172. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.05.030

38. *van Hardenbroek M., Chakraborty A., Davies K.L. et al.* The stable isotope composition of organic and inorganic fossils in lake sediment records: Current understanding, challenges, and future directions // Quaternary Science Reviews. 2018. Vol. 196. P. 154-176. DOI: 10.1016/j.quascirev.2018.08.003

39. *Beckers F., Rinklebe J.* Cycling of mercury in the environment: Sources, fate, and human health implications: A review // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2017. Vol. 47. Iss. 9. P. 693-794. DOI: 10.1080/10643389.2017.1326277

40. *Meng Chuan Ong, Hui-Juan Pan, Shazili N.A.M. et al.* Heavy Metals Concentration in Sediments of South Brittany Waters, France: An Ecological Risk Assessment Approach Assessment Approach // Open Journal of Marine Science. 2021. Vol. 11. № 1. P. 55-68. DOI: 10.4236/ojms.2021.111004

41. *Hyeryeong Jeong, Jin Young Choi, Jihyun Lee et al.* Heavy metal pollution by road-deposited sediments and its contribution to total suspended solids in rainfall runoff from intensive industrial areas // Environmental Pollution. 2020. Vol. 265. Part A. № 115028. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115028

***Авторы*: Вилли К. Нуграха,** *д-р философии, научный сотрудник, докторант, https://orcid.org/0000-0003-1542-6701* (*Исследовательский центр экологии и чистого производства, Национальное агентство исследований и инноваций, Южный Тангеранг, Индонезия*; *Префектурный университет Кумамото, Кумамото, Япония*), **Хуйхо Чон,** *д-р философии, докторант, https://orcid.org/0000-0003-1987-1386* (*Префектурный университет Кумамото, Кумамото, Япония*), **Фан Динь Куан,** *д-р философии, докторант, научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-4553-5581 (Префектурный университет Кумамото, Кумамото, Япония*; *Вьетнамский национальный институт охраны труда и здоровья, Ханой, Вьетнам*), **Рэнди Новирса,** *д-р философии, докторант, преподаватель, https://orcid.org/0000-0003-0477-1067* (*Префектурный университет Кумамото, Кумамото, Япония*; *Университет Андалас, Западная Суматра, Индонезия*), **Томохиро Коморита,** *доцент, преподаватель, https://orcid.org/0000-0002-9469-5602* (*Префектурный университет Кумамото, Кумамото, Япония*), **Ясухиро Исибаси,** *профессор, заведующий кафедрой охраны окружающей среды и симбиотических систем, https://orcid.org/0000-0002-2610-0849* (*Префектурный университет Кумамото, Кумамото, Япония*), **Дзюн Кобаяси,** *профессор, https://orcid.org/0000-0003-0493-6386* (*Префектурный университет Кумамото, Кумамото, Япония*), **Кодзи Аризоно,** *профессор, https://orcid.org/0000-0002-9148-9176* (*Префектурный университет Кумамото, Кумамото, Япония*), **Асеп Баю Дани Нандиянто,** *профессор, преподаватель, nandiyanto@upi.edu, https://orcid.org/0000-0002-9753-1267* (*Индонезийский педагогический университет, Бандун, Индонезия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0