ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 553.41
https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-471-484

Загрязнение бассейна реки Джелтулак-1 при россыпной золотодобыче (Амурская область)

Валентина Ивановна Радомская[a], Сергей Михайлович Радомский[b], Александр Сергеевич Сегренев[c], Софья Яновна Кулик[d]
[a–c]*Институт геологии и природопользования ДВО РАН, г. Благовещенск, Россия*
[d]*Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, г. Санкт-Петербург, Россия*
Автор, ответственный за переписку: Радомская Валентина Ивановна, radomskaya@ascnet.ru

Резюме. Целью представленного исследования являлось изучение влияния россыпной золотодобычи на природную среду. Объектом исследования служили природные и природно-техногенные геосистемы реки Джелтулак-1 в Амурской области. Содержания основных катионов и микроэлементов в пробах воды определяли атомно-эмиссионным и масс-спектральным методами. Содержание микро- и породообразующих элементов в донных отложениях, почвах устанавливали рентгенофлуоресцентным методом на рентгеновском спектрометре XRF-1800 (Shimadzu, Япония). Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что содержание железа, марганца, меди, алюминия, ванадия, молибдена, ртути и ионов аммония превышает рыбохозяйственные нормативы в значительной части проб поверхностных вод. Установлено негативное влияние отстойников на качество воды в реке Джелтулак-1 ниже по течению вследствие дренажа дамб. Наибольшие концентрации растворенных форм ртути отмечены в воде отстойников. Валовое содержание мышьяка в пробах донных отложений и почв выше санитарно-гигиенических нормативов в 2,7–14,5 раза. Для ртути – самого опасного поллютанта – детально проработаны распределения среди биогенных компонентов геохимического ландшафта. Выполнено разделение ртутного загрязнения почв по формам нахождения ртути на свободную, физически сорбированную, хемосорбированную, сульфидную и изоморфную формы. Показано, что свободная форма характерна для свежих ртутных загрязнений из-за использования запрещенных технологических схем обогащения золотосодержащих песков методом амальгамации.

Ключевые слова: загрязнение бассейна реки Джелтулак-1, россыпная золотодобыча, Приамурье

Для цитирования: Радомская В. И., Радомский С. М., Сегренев А. С., Кулик С. Я. Загрязнение бассейна реки Джелтулак-1 при россыпной золотодобыче (Амурская область) // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 4. С. 471–484. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-471-484.

GEOECOLOGY

Original article

Contamination of the Dzheltulak-1 river basin under alluvial gold mining (the Amur region)

Valentina I. Radomskaya[a], Sergey M. Radomskiy[b], Alexander S. Segrenev[c], Sofya Ya. Kulik[d]
[a–c]*Institute of Geology and Nature Management, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Blagoveshchensk, Russia*
[d]*Herzen University, Saint Petersburg, Russia*
Corresponding author: Valentina I. Radomskaya, radomskaya@ascnet.ru

Abstract. The purpose of the introduced research is to study the environmental impact of placer gold mining. The object of the study is natural and natural-man-made geosystems of the Dzheltulak-1 river located in the Amur region. The content of the main cations and microelements in water samples was determined by atomic emission and mass spectral methods.

© Радомская В. И., Радомский С. М., Сегренев А. С., Кулик С. Я., 2021

The content of micro- and rock-forming elements in bottom sediments and soils was determined by X-ray fluorescence using XRF-1800 X-ray spectrometer (Shimadzu, Japan). The results of the conducted studies indicate that the contents of iron, manganese, copper, aluminum, vanadium, molybdenum, mercury and ammonium ions exceed commercial fishery standards in a significant part of the surface water samples. It is found out that settlement ponds negatively affect the water quality in the river Dzheltulak-1 downstream due to the dam drainage. The highest concentrations of dissolved forms of mercury were noted in the water of the settlement ponds. The gross content of arsenic in the samples of bottom sediments and soils exceeds sanitary and hygienic standards by 2.7–14.5 times. The distributions of mercury as the most dangerous pollutant among the biogenic components of geochemical landscape were worked out in detail. Mercury contamination of soils was classified according to the forms of mercury occurrence: free, physically sorbed, chemisorbed, sulfide and isomorphic. It has been shown that the free form is characteristic of fresh mercury contamination due to the use of prohibited technological schemes for gold-bearing sands separation by the amalgamation method.

Keywords: pollution of the Dzheltulak-1 river basin, alluvial gold mining, Amur region

For citation: Radomskaya V. I., Radomskiy S. M., Segrenev A. S., Kulik S. Ya. Contamination of the Dzheltulak-1 river basin under alluvial gold mining (the Amur region). *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2021;44(4):471-484. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-471-484.

Введение

Реки Амурского бассейна богаты золотыми россыпями, и люди уже более столетия моют здесь золото [1]. На территории Амурской области добычу золота осуществляют более 60 предприятий. Несмотря на большое количество научных работ о воздействии золотодобычи на окружающую среду [2–7], комплексной оценки воздействия золотодобывающих предприятий на экосистемы речных бассейнов Амура до сих пор никем не проводилось. Опыт контролирующих организаций показывает, что в силу многочисленности артелей и удаленности районов работ организация постоянного контроля за качеством воды и состоянием водотоков, испытывающих воздействие золотых приисков, невозможна. В результате объективная картина влияния разработок золотоносных месторождений на водотоки отсутствует, а от внимания государства ускользают острые экологические, экономические и социальные проблемы, возникающие при золотодобыче. Кроме того, следует отметить, что многие отрабатываемые в настоящее время россыпные месторождения загрязнены ртутью в результате добычных работ прошлых лет [8]. Метод амальгамации, основанный на избирательном смачивании ртутью частиц золота, длительное время был обязательным звеном традиционных технологических схем обогащения золотосодержащих руд и песков. Несмотря на то что на сегодняшний день уже разработаны современные эффективные амальгамационные технологии, серийного оборудования для их осуществления в нашей стране так и не было создано. Аппаратурное оформление носило, как правило, полукустарный характер. Стадия отпарки ртути из амальгамированного золота – одна из наиболее экологически опасных операций – осуществлялась чаще всего в печах без эффективной системы конденсации и улавливания паров ртути. В небольших артелях, не имеющих средств на закупку дорогостоящего обогатительного оборудования, не только амальгамацию, но иногда и отпарку вели вручную на открытом огне [9]. В связи с этим количество техногенной ртути, сброшенной в природную среду в районах золотодобычи в Амурской области, только за период 1969–1974 гг. составило более 16 т [10]. Процесс добычи золота не являлся экологически безопасным, часто из-за кустарного применения металлической ртути для амальгамации тонкого золота в прошлом и настоящем [8, 11–13]. В конце 1988 г. Главное управление драгоценных металлов и алмазов при Кабинете министров СССР запретило применение амальгамации золота. Тем не менее такая практика незаконно продолжается на некоторых артелях Приамурья до настоящего времени.

Северные районы Амурской области относятся к одному их самых богатых минеральным сырьем регионов России. На территории этих районов сконцентрированы значительные месторождения россыпного золота. В географическом отношении к этому региону относятся Зейский и Мазановский районы Амурской области. В Зейском районе зарегистрировано 27 предприятий по добыче россыпного золота. Нами было проведено обследование

нарушенных территорий, сформированных при освоении золоторосыпных месторождений в среднем течении р. Джелтулак-1. Река Джелтулак-1 имеет протяженность 38 км, берет начало у подножья Гарь-Калахтинского водораздела и впадает с правого берега в р. Большой Джелтулак (бассейн р. Селемджи) на 22 км от устья. Она принимает 17 притоков, из них 16 притоков имеют длину менее 10 км каждый и общую протяженность 54 км. На водосборе реки находится 11 озер общей площадью 0,44 км^2. Джелтулак-1 относится к водотоку высшей категории водных объектов рыбохозяйственного значения. Такая категория устанавливается для водных объектов, которые являются местами обитания, размножения, зимовки, нагула, путями миграций особо ценных и ценных видов водных биологических ресурсов (при наличии одного из показателей).

На сегодняшний день, согласно выданным лицензиям, золотодобычу на р. Джелтулак-1 осуществляют три старательских артели.

На данном этапе цель нашей работы – изучение влияния россыпной золотодобычи на бассейново-речные геосистемы водосбора р. Амур. Объектом исследования служили природные и природно-техногенные геосистемы р. Джелтулак-1.

В административном отношении исследуемая территория расположена в Зейском районе Амурской области. Долины водотоков данного района характеризуются значительной шириной, пологим спокойным продольным профилем и наличием пологих, значительных по ширине увалов (террасоувалов), постепенно переходящих в междуречные пространства и водоразделы. Гидрологический режим водотоков типичен для дальневосточных рек. Замерзают они в конце октября – начале ноября, толщина льда в конце зимы достигает 1–1,5 м. Летом после дождей на реках бывают паводки, при которых уровень воды поднимается на 1–3 м. Питание рек обеспечивается в основном за счет дождей (50–70 % годового стока), на снеговое питание приходится 10–20 %, на грунтовые воды – 10–30 %. В долинах рек широко развиты травяные с кочковатой поверхностью («кочковатая марь») болота глубиной до 1 м. Замерзание болот начинается в конце октября, а в декабре они промерзают на всю глубину и становятся проходимыми для всех видов транспорта. Оттаивание болот протекает медленно и заканчивается в июле – начале августа. Во время дождей болота заливаются водой и становятся непроходимыми.

Лесная растительность (в основном лиственница и береза) покрывает междуречье и водораздельное пространство, хотя редко образует сплошные массивы.

Климат района континентальный. Зима здесь суровая и продолжительная (с середины октября до середины апреля) с преобладанием тихой ясной погоды. Снега зимой выпадает мало. Устойчивый снежный покров устанавливается в конце октября и к марту составляет 0,2–0,5 м. Минимальная температура достигает -47 °С. Весна короткая (с середины апреля до конца мая), отличается неустойчивой погодой и наиболее сильными ветрами. Снежный покров сходит в конце апреля, в это же время начинается ледоход. Лето теплое с преимущественно облачной погодой. Преобладающая дневная температура воздуха в самый теплый период (июнь – август) – 17–22 °С (табл. 1).

Летом осадки выпадают чаще, чем в другие времена года. Осень (начало сентября – конец октября) в районе исследования короткая, по сравнению с летом имеет меньшую облачность и меньшее количество дней с осадками (табл. 2). Ветра в течение года преобладают северные и северо-западные со средней скоростью 2,3 м/с.

Таблица 1. Средняя месячная температура воздуха района исследования, °С
Table 1. Average monthly air temperature in the district under investigation, °C

Период	Месяц												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Температура воздуха	-26,9	-21,1	-11,2	1	9,2	16,2	18,6	16,2	9,3	1	-16	-25	-2,9

Примечание. Таблица составлена по данным метеостанции Мазаново.
Note. The table is compiled on the basis of the data of Mazanovo meteostation.

Таблица 2. Среднее месячное количество осадков района исследования, мм
Table 2. Average monthly precipitation in the district under investigation, mm

Период	Месяц												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Количество осадков	6,7	4	11,6	38,5	43,3	81,8	134,2	133	74,2	27,5	16,6	8	579,4

Примечание. Таблица составлена по данным метеостанции Мазаново.
Note. The table is compiled on the basis of the data of Mazanovo meteostation.

Зейский район располагается в зоне многолетней мерзлоты, глубина распространения которой составляет 150–180 м. По климатическим условиям данная территория приравнивается к районам Крайнего Севера.

Материалы и методы исследования

Авторами были изучены природные воды р. Джелтулак -1, донные отложения и почвы в районе отбора проб воды. Исследования проведены в 2018 г. в средней части бассейна реки. Общая протяженность маршрута составила более 25 км, в его пределах были отобраны пробы в дражных отстойниках и в русле реки: ПР-1, ПР-3 – отстойники; ПР-2, ПР-4 – р. Джелтулак, 1500 м ниже отстойников; ПР-5 – р. Джелтулак, в районе старой золотодобычи. Отстойники имеют площадь около 50 тыс. м^2. С целью охраны вод предусмотрен замкнутый цикл оборотного водоснабжения, сокращающий потребление свежей воды и исключающий открытый сброс технологической воды в водоток, с последующей очисткой технологических вод в рабочих и фильтрационном отстойниках. Сток дренажных вод из фильтрационного отстойника будет попадать в р. Джелтулак-1.

Одновременно с отбором водных проб в тех же точках отбирали донные отложения. Отбор проб донных отложений осуществляли методом вычерпывания у берегов с глубины 0,3–0,5 м с заглублением в дно до 10–15 см. Проводили отбор почвы с пробных площадок, расположенных в районе отбора проб воды. Отбор почв производился точечным способом методом конверта из верхнего слоя с глубины 0–20 см. Из пяти точечных проб с одной пробной площадки составляли объединенную пробу весом примерно 1 кг[1]. Отобранные пробы почвы и донных отложений высушивали, просеивали через сито с диаметром 1 мм. Схема отбора проб приведена на рис. 1. Кроме того, были отобраны вода в р. Калахта (точка отбора К-0) и питьевая вода из скважины глубиной 25 м в пос. Октябрьский. На старых отвалах, где ранее происходила добыча золота с использованием метода амальгамации, были отобраны пробы почв Пр-5$_{почва}$, Пр-6$_{почва}$.

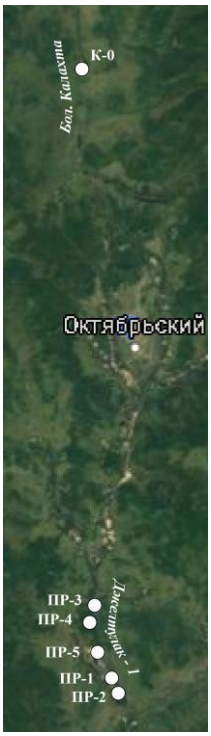

Рис. 1. Схема отбора проб в районе исследования
Fig. 1. Sampling diagram in the area under investigation

Водные пробы фильтровали через бумажный фильтр с размером пор 1000 нм («синяя лента»). Пробы воды ПР-1$_{вода}$, ПР-3$_{вода}$ фильтровали через три мембранных фильтра с диаметром пор 0,5 мкм.

[1] Гуляева Н. Г. Методические рекомендации по эколого-геохимической оценке территорий при проведении многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:1000000 и 1:200000. М.: Изд-во ИМГРЭ, 2002. 70 с.

Для определения микроэлементного состава профильтрованные пробы воды отбирали в пластиковые пробирки, консервировали азотной кислотой, для определения ртути консервировали азотной кислотой и бихроматом калия.

Содержания основных катионов и микроэлементов в пробах воды определяли атомно-эмиссионным (iCAP-6500, Thermo Scientific, США) и масс-спектральным (X-7, Thermo Elemental, США) методами в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук. Анализы химического состава вод – pH, содержания минеральных азотсодержащих веществ, хлоридов, сульфатов, гидрокарбонатов, ортофосфатов – проводили по стандартным методикам в Аналитическом центре минералого-геохимических исследований ИГиП ДВО РАН. Определение содержаний породообразующих элементов и некоторых микроэлементов в донных отложениях выполняли рентгенофлуоресцентным методом в Институте геологии и природопользования Дальневосточного отделения Российской академии наук на рентгеновском спектрометре XRF-1800 (Shimadzu, Япония).

Газортутные измерения припочвенного и придонного воздуха были проведены прибором АГП-01.

Термоформы ртути были определены методом атомной абсорбции (пиролиза) на ртутном анализаторе РА-915+ с приставкой ПИРО-915+ в Международном инновационном научно-образовательном центре «Урановая геология» им. Л. П. Рихванова Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета. Для определения термоформ ртути была использована программа управления температурой атомизатора, обеспечивающая наиболее эффективное разделение пиков выхода ртути при нагреве образцов, что позволило измерять содержание ртути в образцах при их нагревании в режиме температурно-программированного нагрева [14]. Это давало возможность разделять соединения ртути, связанные с поверхностью связями различной прочности. Режим регистрации термоформ реализовался с помощью программы «Рапид» и был следующим: температурный диапазон – 25–850 °C, скорость нагрева – 0,8 град./с, продолжительность нагрева – 15 мин. Предел обнаружения метода – 5 нг/г. Для контроля точности определения ртути использовали стандартные образцы состава дерново-подзолистой супесчаной почвы СДПС-3 (ГСО 2500-83).

Результаты исследования и их обсуждение

Известно, что величина pH является важным показателем геохимического состояния вод, от которого зависит устойчивость форм миграции химических элементов и степень неравновесности вод относительно подстилающих пород. Изученные поверхностные воды относятся к слабощелочным (табл. 3).

По химическому составу воды можно отнести к гидрокарбонатным кальциевым, реже – сульфатно-гидрокарбонатным натриево-кальциевым (табл. 4). Согласно классификации О. А. Алёкина, воды на изученной территории пресные или ультрапресные с малой минерализацией.

В речных водах района исследования отмечается нарушение рыбохозяйственных нормативов по содержанию ионов аммония на всех точках отбора (см. табл. 3). Вероятно, это связано с природными факторами, в частности с трансформацией органического вещества в лесных ландшафтах и последующим выносом образующихся продуктов в речную сеть. Нельзя отрицать и влияние антропогенных факторов. Повышенное содержание в водной системе ионов аммония может быть следствием отсутствия очистных сооружений.

Концентрации железа и микроэлементов в речных водах рассматриваемой территории изменяются в широком диапазоне (табл. 5). Подавляющая часть микрокомпонентов содержится в концентрациях, не превышающих предельно допустимые концентрации вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (*ПДК*$_{вр}$), концентрации скандия, галлия, германия, селена, рутения, родия, палладия, осмия, иридия, платины, индия, теллура ниже предела обнаружения. Для железа, марганца, меди, алюминия,

Таблица 3. Средний химический состав вод реки Джелтулак-1, мг/дм³
Table 3. Average chemical composition of water of the Dzheltulak-1 river, mg/dm³

Компонент	Точка отбора							*ПДК*$_{вр}$[2]
	ПР-1$_{вода}$	ПР-2$_{вода}$	ПР-3$_{вода}$	ПР-4$_{вода}$	ПР-5$_{вода}$	К-0 (Калахта)	Скважина	
pH	7,59	8,03	7,76	7,56	8,6	8,02	8,2	
NO_2^-	0,53	0,035	0,055	0,049	0,027	0,023	0,028	0,08
NO_3^-	2,4	0,8	0,4	2	0,5	0,5	2,6	40
NH_4^+	1,77	1,14	1,25	0,93	0,83	1,25	0,31	0,5
HCO_3^-	64,66	118,3	43,92	36,6	187,9	76,86	137,9	–
PO_4^{3-}	0,034	0,022	0,017	0,006	0,023	0,027	0,029	0,05
Cl^-	3,26	3,47	2,97	3,54	15,93	3,54	2,83	300
SO_4^{2-}	16,7	<1	15,02	10,2	<1	<1	<1	100
Li	0,001	0,001	0,0006	0,0008	0,0029	0,0011	0,0016	0,08
K	3,56	0,89	2,45	1,53	3,63	0,49	2,53	50
Na	10,3	3,98	5,49	3,75	6,25	3,38	4	120
Ca	24,4	34,6	14,8	24,5	75,9	20,9	37,2	180
Mg	3,69	5,49	2,02	2,89	8,69	3,19	7,89	40

Таблица 4. Характеристика гидрохимического типа речных вод на россыпных месторождениях района исследования
Table 4. Characteristics of the hydrochemical type of river water at placer deposits of the area under investigation

Точка отбора	Формула Курлова	Гидрохимический тип вод
ПР-1$_{вода}$	$M0{,}13\frac{HCO_3^-69[SO_4^{2-}23Cl^-6]}{Ca\,52Na26[Mg13]}$	Гидрокарбонатная натриево-кальциевая, пресная
ПР-2$_{вода}$	$M0{,}17\frac{HCO_3^-94[Cl^-5]}{Ca\,70[Mg18Na9]}$	Гидрокарбонатная кальциевая, пресная
ПР-3$_{вода}$	$M0{,}09\frac{HCO_3^-64SO_4^{2-}28[Cl^-7]}{Ca\,54Na25[Mg12]}$	Сульфатно-гидрокарбонатная натриево-кальциевая, ультрапресная
ПР-4$_{вода}$	$M0{,}09\frac{HCO_3^-64[SO_4^{2-}22Cl^-11]}{Ca\,67[Na14Mg13]}$	Гидрокарбонатная кальциевая, ультрапресная
ПР-5$_{вода}$	$M0{,}3\frac{HCO_3^-87[Cl^-13]}{Ca\,76[Mg14Na9]}$	Гидрокарбонатная кальциевая, пресная
Калахта	$M0{,}11\frac{HCO_3^-91[Cl^-7]}{Ca\,66[Mg17Na11]}$	Гидрокарбонатная кальциевая, пресная

ванадия, молибдена и ртути отмечено превышение рыбохозяйственных нормативов в значительной части проб поверхностных вод. Для никеля, свинца и цинка превышение нормативов наблюдается только в отстойниках. Наибольшее превышение (в десятки раз) характерно для железа, марганца, меди, алюминия. Наибольшее содержание этих элементов отмечено в водах отстойников (см. табл. 5). В пробах воды из р. Джелтулак-1 ниже отстойников оно значительно меньше, но выше предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения, что свидетельствует о проницаемости дамб и просачивании неосветленных вод в р. Джелтулак-1.

В водных объектах, находящихся в техногенных зонах, концентрации растворенных форм ртути изменялись от 0,01 до 1,7 мкг/дм³. Максимальное их содержание отмечено в воде отстойников. В рабочих отстойниках находится вода в виде пульпы с промприборов. В отстойниках происходит складирование хвостов промывки и очистка технологической воды от крупной фракции эфелей.

[2] Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Приложение к приказу Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 г. № 552 // Base.garant.ru [Электронный ресурс]. URL: https://base.garant.ru/71586774/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/ (13.08.2021).

Таблица 5. Среднее содержание микроэлементов в поверхностных водах Джелтулакского золоторосыпного месторождения, мкг/дм³
Table 5. Average content of trace elements in the surface water of the Dzheltulak gold placer deposit, μg/dm³

Элемент	Точка отбора							*ПДК*$_в$[3]	*ПДК*$_{вр}$
	ПР-1$_{вода}$	ПР-2$_{вода}$	ПР-3$_{вода}$	ПР-4$_{вода}$	ПР-5$_{вода}$	Калахта (вода)	Питьевая вода		
Ti	6,6	1,7	8,3	12,3	1,7	2,1	1,1	100	60
Al	798	44,4	642	1214	294	74,3	552,1	200	40
Fe	3151	790	1478	1234	144	843	11,1	300	100
Mn	187	11,4	40,1	578	32,9	6,1	25,6	100	10
Li	2,13	1,56	1,88	2,24	2,61	1,66	2,81	30	80
Be	0,082	0,013	0,052	0,059	0,013	0,015	<0,007	0,2	0,3
V	2,2	0,47	2	1,6	0,9	0,5	2,1	100	1
Cr	12,8	2,5	5,9	25,1	<7	<7	<7	50	70 (Cr^{+3})
Co	1,12	< 0,07	0,62	0,85	0,16	<0,07	<0,07	100	10
Ni	11,4	1,8	12,4	4,1	2	2,2	<0,2	20	10
Cu	93,7	1,3	33,4	2,8	2,8	2,3	4,4	1000	1
Zn	131	1,2	49,7	7,7	2,6	4,5	2,8	5000	10
As	2,1	2,4	1,2	2,4	5,1	0,75	4,4	10	50
Rb	1,33	0,52	1,18	1,36	1,15	0,44	3,01	100	100
Sr	109	152	49,9	113	317	89,7	154	7000	400
Y	0,76	0,11	0,48	0,36	0,085	0,21	0,040	–	–
Zr	0,7	0,26	0,67	0,72	0,18	0,26	0,1	–	70
Nb	0,027	0,0043	0,026	0,043	0,012	0,0078	0,016	10	–
Mo	1,7	1,31	3	0,43	1,28	1,33	4,11	70	1
Ag	0,035	<0,006	1,34	0,01	<0,006	0,01	<0,006	50	–
Cd	0,046	0,0072	0,19	0,016	0,022	<0,006	0,079	1	5
Sn	13,71	0,073	4,98	2,67	1,42	0,52	0,64	2000	112
Sb	0,44	0,2	0,42	0,28	0,58	0,097	0,77	5	–
Cs	0,029	0,0052	0,046	0,075	0,0092	0,009	0,082	–	1000
Ba	123	83,5	66,4	144	140	57,1	59	700	740
Hf	0,258	0,0077	0,028	0,036	0,0052	0,009	<0,004	–	–
W	0,14	0,0088	0,21	0,028	0,03	0,0077	1,04	50	0,8
Tl	0,0069	0,0012	0,0097	0,0074	0,0029	0,014	0,0038	0,1	–
Pb	7,1	0,48	4,2	1,3	0,55	1,5	0,29	100	6
Bi	0,04	0,0093	0,055	0,14	0,038	0,024	0,0046	100	–
Th	0,43	0,022	0,26	0,16	0,02	0,028	0,024	–	–
U	0,32	0,63	0,3	0,19	2,52	0,095	0,36	15	–
Hg	1,7	0,027	2,2	0,01	0,027	0,026	0,024	0,5	0,01

Примечание. Прочерк – нет нормативов.
Note. Line stands for no standards.

В течение длительного времени и вплоть до 1988 г. в России процесс золотодобычи сопровождался применением металлической ртути для извлечения тонкого золота. Мелкие старательские артели чаще всего удаляли ртуть из амальгамированного золота кустарным способом. История золотодобычи в Приамурье насчитывает более 160 лет. Так как в прошлом веке на исследуемой территории старатели добывали золото, было сделано предположение, что донные отложения старых техногенных водоемов загрязнены ртутью, поэтому за счет ее миграции в водную фазу концентрация растворенной формы ртути повышена. Кроме того, в результате развития гетеротрофных микроорганизмов в придонных слоях воды водоемов-отстойников возрастает вероятность микробиального метилирования ртути и накопления ее в трофических цепях водных экосистем [9].

[3] СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания // Docs.cntd.ru [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/573500115#6560IO (13.08.2021).

Основными источниками элементов при формировании химического состава водных систем являются породы [15], и, вероятно, различия в водовмещающих породах, слагающих литооснову, отражаются на химическом составе природных вод. На границе двух фаз – твердой и жидкой – начинаются процессы перехода химических элементов в раствор и их миграция.

Одной из проблем золотодобычи на россыпных месторождениях является рост в речной воде из-за работы драги взвешенных частиц, размер которых составляет более 0,5 мкм. Рост уровня замутненности приводит к увеличению наносов в водоеме, затрудняет проникновение света в толщу воды, вызывает деформацию русла. В замутненной воде угнетается рост водорослей и макрофитов из-за уменьшения фотосинтеза и физического подавления растительности на дне водоема. Снижается количество и разнообразие бентосных беспозвоночных в результате уменьшения растительности, засорения пищевого аппарата мелкими взвешенными частицами и отсутствия подходящих условий для обитания в наддонном слое. В составе сообщества будут преобладать те виды, которые более приспособлены к обитанию в сильно замутненных водах. Рыба страдает в результате уменьшения количества пищи. Из-за повышения содержания мягкого грунта в слоях придонного гравия, служащего местом нереста, уменьшается скорость водного потока внутри слоя гравия, а вследствие этого и способность пластовой воды переносить кислород, что влияет на выживаемость икры и мальков.

Таким образом, присутствие взвеси в водоемах в периоды, когда не происходит естественного размыва наносов, сопровождается отложением на дне мелкофракционного грунта, что приводит к отрицательным последствиям. При этом наибольшую опасность для водоемов представляют не одноразовые, а постоянные вредные воздействия, которые снижают способность организма к выживанию. Согласно данным, приведенным в источнике [16], безопасным является уровень содержания взвешенных твердых частиц не выше 25 мг/л, уровень же 100–400 мг/л губителен для выживания популяции рыбы в количестве, имеющем промышленное значение.

Было установлено, что в рабочих отстойниках осаждаются только частицы крупнее 100 мкм. Основная масса взвешенных частиц представляет собой сцепленные из мелких частиц конгломераты (рис. 2). Размер частиц варьирует от 0,64 до 70 мкм. Просачиваясь через тело фильтрационной дамбы, взвешенные частицы попадают в водоток. Это не соответствует санитарным нормам водных объектов высшей категории рыбохозяйственного значения и не позволяет без использования дополнительной очистки при сбросе сточных вод достичь природного фонового содержания взвешенных веществ 20 мг/дм^3 для данной реки.

По сравнению с составом верхней континентальной коры [17] средний состав почв и донных отложений (табл. 6) характеризуется относительным дефицитом почти всех породообразующих оксидов и многих элементов. Исключение составляют оксиды кремния и титана, содержание которых приближено к содержанию их в верхней континентальной коре.

Наблюдаются существенно высокие содержания мышьяка, хрома, ртути. Коэффициенты концентраций, рассчитанные как отношение среднего содержания элемента в почве и донных отложениях к условному кларку элемента в верхней континентальной коре (по С. Тейлору и С. Макленнану), составляют в среднем: для хрома – 2,4; для мышьяка – 9,7 и 11,6 соответственно; для ртути – 5,1 и 2,1 соответственно. Валовое содержание мышьяка в пробах донных отложений и почв выше санитарно-гигиенических нормативов. Превышение предельно допустимых концентраций по мышьяку составило 2,7–14,5 раза. Повышенная концентрация мышьяка свидетельствует, скорее всего, о природных металлогенических особенностях территории Амурской области [18, 19].

Как уже отмечалось выше, одной из проблем россыпной золотодобычи является ртутное загрязнение от золотодобычи прошлых лет. Для корректной оценки степени ртутного загрязнения за счет использования ртутной амальгамации необходимо сопоставить содержание ртути фоновой и техногенной территорий, на которых непосредственно использовалась ртуть. При обследовании территории р. Джелтулак-1 были изучены старые

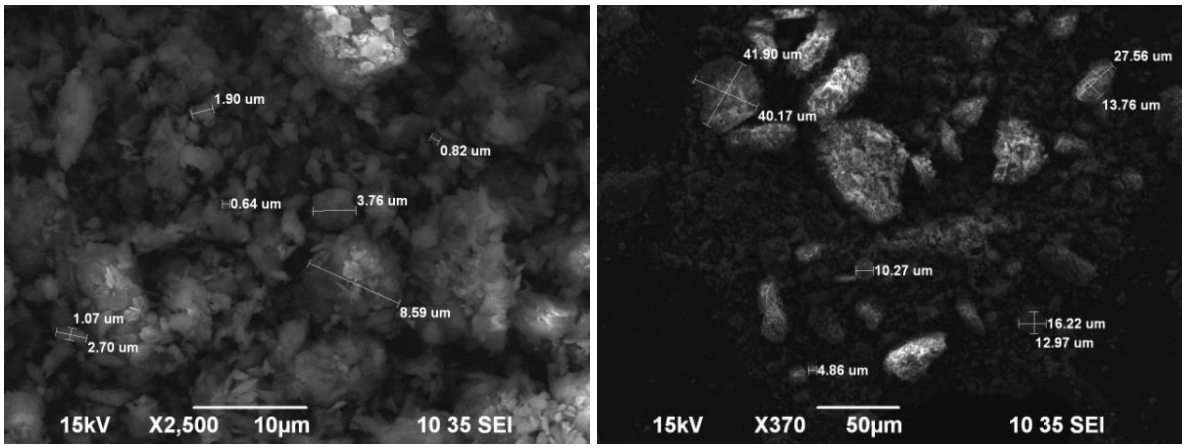

Рис. 2. Электронные снимки взвешенных частиц в отстойниках реки Джелтулак-1
Fig. 2. Electronic images of suspended particles in Dzheltulak-1 settlement ponds

Таблица 6. Химический состав донных отложений, почв, % / мг/кг, и содержание ртути* в надпочвенном воздухе, мкг/м^3
Table 6. Chemical composition of bottom sediments, soils, % / mg/kg, and mercury content* in above the soil surface air, μg/m^3

Компонент	Почва						Донные отложения					Верхняя континентальная кора [17]	*ПДК$_{почв}$*[4]
	ПР-1	ПР-2	ПР-3	ПР-4	ПР-5	ПР-6	ПР-1	ПР-2	ПР-3	ПР-4	ПР-5		
SiO_2	68,6	71	74,4	59,3	57,8	66,4	67,3	72,6	73	72,3	70,6	66	–
Al_2O_3	14,6	12,9	12,5	15,2	13,9	14,1	15,6	13,2	11,8	13,3	13,8	15,2	–
TiO_2	0,49	0,46	0,37	0,69	0,61	0,62	0,67	0,39	0,53	0,27	0,53	0,5	–
CaO	0,58	0,81	0,83	2,76	1,39	1,27	0,99	0,63	0,84	0,85	1	4,2	–
MnO	0,07	0,05	0,04	0,06	0,06	0,08	0,04	0,04	0,05	0,08	0,05	0,077	0,19
Fe_2O_3	2,73	2,64	2,2	4,57	4,35	3,95	2,76	2,29	2,27	1,93	3	4,5	–
MgO	0,5	0,59	0,53	1,89	0,84	0,86	0,54	0,31	0,45	0,6	0,59	2,2	–
K_2O	3,26	3,07	2,89	2,15	2,43	2,77	2,98	3,52	2,82	3,66	2,92	3,4	–
Na_2O	2,05	1,84	2,68	2,73	1,33	1,48	2,74	3,01	2,55	2,53	1,75	3,9	–
P_2O_5	0,08	0,1	0,07	0,11	0,16	0,1	0,09	0,07	0,07	0,06	0,08	0,2	–
V	63,6	61,6	35,4	97,3	96,9	82,9	62,8	31,9	45,6	25,9	62,1	60	150
Cr	53,8	54,9	47,5	70,4	186	74,1	75,3	117	127	43,2	63,1	35	–
Co	12,5	8,2	12	18,4	14,7	10,1	10,9	7,5	6,3	7,1	11,1	10	–
Ni	29,2	21,4	26,1	30,8	32,2	30,5	21,4	24,9	23,4	19,2	27	20	–
Cu	20,5	27,7	17,1	16,5	28,1	26,6	15,5	19,9	12,2	13,8	21,7	25	132
Zn	48,1	73,3	37,2	77	85	91,5	62,3	32,7	38	35,6	57,1	71	–
Rb	123	123	108	67,3	117	117	95,6	114	104	117	118	112	–
Sr	182	188	224	367	231	218	247	206	216	220	2178	350	–
Y	17,5	16,5	14,3	22,1	38,7	21	20,5	29	17,7	15,2	20,9	22	–
Nb	12,5	11,3	9	8,1	13,1	12,3	16,2	9,5	10,4	7,0	10,9	25	–
Zr	203	223	147	189	229	188	396	166	218	130	195	190	–
Ba	1016	836	739	1248	737	802	1018	1170	745	1273	792	550	–
As	9,6	5,4	16,8	17,2	28,4	12,7	15,3	5,7	26,1	11,3	28,9	1,5	2
Pb	15,8	23,0	9	19,3	16,2	18,3	15,6	18,3	15,4	13,7	18,9	20	32
Hg	0,04	0,34	0,09	0,03	0,8	1	0,02	0,14	0,09	0,03	0,4	0,065	2,1
Hg*	0,06	0,04	0,04	0,02	0,03	0,09	0,03	0,02	0,03	0,02	0,04	–	–

Примечание. Концентрации оксидов от SiO_2 до P_2O_5 приведены в процентах, микроэлементов – в мг/кг. Прочерк – нет значений.
Note. Oxide concentrations from SiO_2 to P_2O_5 are given in per cents %, trace elements – in mg/kg. Line indicates no values.

[4] ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве // Docs.cntd.ru [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/901966754?marker=6500IL (13.08.2021).

отвалы, созданные артелью, которая активно использовала амальгамацию россыпного золота. Часть отвалов в настоящее время рекультивирована. В табл. 6 также приведены данные по измерению ртути в надпочвенном воздухе проб почв и донных отложений (показатель Hg*). По данным измерения концентрации паров ртути над поверхностью образцов почвогрунтов было зафиксировано значительное превышение по сравнению с предельно допустимыми концентрациями для атмосферного воздуха – в среднем на два порядка ($ПДК_{возд}$ = 0,0003 мг/м^3). При замерах надпочвенного воздуха с помощью АГП-01 для повышения точности и чувствительности определения в каждой точке сделано по пять измерений на разных диапазонах объемов анализируемого воздуха. Максимальные концентрации были зафиксированы в надпочвенном воздухе старого отвала (проба ПР-6$_{почва}$), что объясняется, вероятнее всего, более сильным загрязнением почв в результате использования ртути в обогатительном процессе.

Сведения о фоновых концентрациях ртути в почвах различных регионов мира различны, и диапазон их колебаний очень большой. Согласно источнику [20], фоновые уровни ртути в почве можно оценить приблизительно в 0,*n* мг/кг. Содержание ртути, превышающее эту величину, следует, по-видимому, рассматривать как загрязнение из антропогенных или других источников. Кларк ртути в почвах составляет 0,02 мг/кг. Почвы прочно связывают ртуть за счет комплексообразования с функциональными группами гумусовых веществ, период ее полувыведения оценивается в 250 лет [21]. Вследствие этого ртутное загрязнение почв носит долговременный характер. Как показали результаты исследований, ртутное загрязнение почв (0,8–1 мк/кг) характерно только для тех объектов, на которых ранее использовалась ртуть (точки ПР-5$_{почва}$, ПР-6$_{почва}$). Содержание ртути в изученных донных отложениях варьировало от 0,015 до 0,4 мг/кг. Донные отложения водотоков и водоемов – одни из самых уязвимых компонентов окружающей среды по отношению к загрязнению токсичными металлами.

Накопление ртути происходит за счет седиментации взвешенного материала, а также в результате сорбции из воды. Фоновое содержание ртути в верхних слоях донных отложений колеблется в интервале 0,01–0,3 мг/кг сухой массы [9]. Повышенные концентрации ртути в донных отложениях (0,4 мг/кг) установлены вблизи старого карьера (ПР-5$_{донные}$), при разработке которого применялась ртуть, и они примерно в 3–30 раз превышают уровень в других точках отбора. Таким образом, добыча золота с применением ртути приводит к возрастанию ее концентрации в донных отложениях водоемов примерно на порядок.

В последнее время при проведении геоэкологических исследований получил распространение термодесорбционный анализ твердофазных природных сред, позволяющий одновременно определять все формы ртути. По его результатам можно разделить природные и техногенные формы ртути. Определение форм ртути в почвах и осадках дает необходимую информацию для оценки потенциального риска, позволяет судить о характере трансформации исходных носителей ртути и особенностях миграции ее соединений, что важно для разработки методов ремедиации загрязненных природных сред [22].

Для диагностики используются следующие температурные параметры: температура максимального выхода $T_м$, температура окончания выхода данной термоформы $T_{ов}$ и разность между ними $T_{ов}$ - $T_м$ – дополнительный параметр, характеризующий ширину температурного интервала выхода данной формы ртути. Характеристики этих диагностических параметров приведены в табл. 7 [23].

В рамках проведенного исследования на небольшом фактическом материале (шесть проб почв и донных отложений) впервые получены данные об относительной доле твердофазных форм ртути на изученных участках ее природной и техногенной эмиссии (рис. 3).

Для пробы ПР-5$_{почва}$ доля физически сорбированной ртути достигает 97,7 %, доля хемосорбированной ртути – 2,3 %. Доля свободной формы ртути в пробе ПР-6$_{почва}$ составляет 97,5 %, доля физически сорбированной ртути – 2,5 %. Такое распределение ртути по формам в пробе ПР-6$_{почва}$ может свидетельствовать о недавнем незаконном применении процесса амальгамации.

Таблица 7. Температурные параметры форм ртути, °С
Table 7. Temperature parameters of mercury forms, °C

Форма ртути	$T_м$	$T_{ов}$	$T_{ов}$ - $T_м$
Свободная (в виде микрокапель жидкой ртути)	150–160	160–180	10–20
Физически сорбированная	250–290	290–360	40–90
Хемосорбированная	310–320	380–400	70–80
Сульфидная	350–410	390–480	40–70
Изоморфная	500–1000	580–1100	80–100

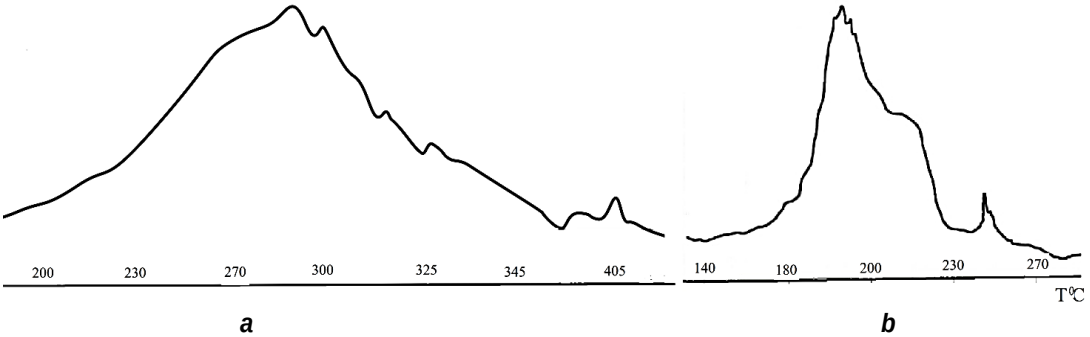

Рис. 3. Термоформы ртути:
a – проба ПР-5$_{почва}$; b – проба ПР-6$_{почва}$
Fig. 3. Mercury thermoforms:
a – sample PR-5$_{soil}$; b – sample PR-6$_{soil}$

Таким образом, воздействие россыпной золотодобычи на окружающую среду многофакторно. Наибольшая опасность данного типа природопользования состоит в широком распространении по речной сети различных воздействий, в том числе высокотоксичного ртутного загрязнения. Поэтому первоочередными задачами эколого-геохимических исследований на севере Амурской области является выявление локальных участков опасного ртутного загрязнения с целью их очистки, а также проведение профилактических мер.

Заключение

Одним из наиболее существенных факторов, обусловливающих ухудшение экологической ситуации на территориях россыпной золотодобычи, является загрязнение природных водотоков. Основной причиной техногенного загрязнения р. Джелтулак-1 становится фильтрационная утечка вод из отстойников. В ходе проведенного исследования нами отмечено превышение предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения по содержанию ионов железа, марганца, меди, алюминия, ртути и взвешенных веществ в р. Джелтулак-1 за пределами золоторазработки. Подобное изменение природного гидрохимического состава воды отрицательно сказывается на рыбных запасах.

В результате исследования также установлены уровни содержания ртути в природных средах в районе россыпной золотодобычи – в среднем течении р. Джелтулак-1. Методом атомной абсорбции на ртутном анализаторе выполнено разделение ртутного загрязнения почв по формам нахождения ртути на свободную, физически сорбированную и хемосорбированную формы. Обнаружен факт недавнего использования запрещенных технологических схем обогащения золотосодержащих песков методом амальгамации.

Список источников

1. Эйриш Л. В. Некоторые геолого-геоморфологические особенности формирования золотоносных россыпей Приамурья // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27. № 5. С. 104–114.

2. Бубнова М. Б. Способ интегральной оценки уровня загрязнения природной среды при эксплуатации месторождений цветных и редких металлов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2006. № 4. С. 86–91.

3. Зелинская Е. В., Горбунова О. И., Щербакова Л. М. Воздействие разработки россыпей на окружающую среду // Горный журнал. 1998. № 5. С. 27–28.

4. Пашкевич М. А. Техногенные массивы и их воздействия на окружающую среду. СПб.: Изд-во СПГГИ, 2000. 229 с.

5. Саксин Б. Г. Прогнозная экологическая оценка регионального воздействия горных работ на окружающую природную среду при добыче цветных и редких металлов на востоке России // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27. № 5. С. 115–123.

6. Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П., Бурцев Л. И. Экологические проблемы освоения недр при устойчивом развитии природы и общества. М.: Научтехлитиздат, 2003. 261 с.

7. Ngure V., Davies T, Kinuthia G., Sitati N., Shisia S., Oyoo-Okoth E. Concentration levels of potentially harmful elements from gold mining in Lake Victoria Region, Kenya: environmental and health implications // Journal of Geochemical Exploration. 2014. Vol. 144. P. 511–516. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.04.004.

8. Коваль А. Т., Павлова Л. М., Радомская В. И., Радомский С. М., Куимова Н. Г., Крылов А. В. Ртуть в экосистемах Приамурья // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2002. № 4. С. 94–103.

9. Лапердина Т. Г., Тупяков А. В., Егоров А. И., Мельникова М. В., Аскарова О. Б., Банщиков В. А. [и др.]. Ртутное загрязнение окружающей среды в зонах влияния золотодобывающих предприятий Забайкалья // Химия в интересах устойчивого развития. 1995. Т. 3. № 1-2. С. 57–67.

10. Коваль А. Т., Сидоров Ю. Ф., Нагорный В. А., Остапчук В. И. Техногенное загрязнение металлической ртутью районов золотодобычи Амурской области и Хабаровского края // Добыча золота. Проблемы и перспективы: доклады науч.-практ. семинара. Хабаровск, 1997. С. 347–352.

11. Yun S.-W., Kim D.-H., Kang D.-H., Son J., Lee S.-Y., Lee C.-K., et al. Effect of farmland type on the transport and spatial distribution of metal(loid)s in agricultural lands near an abandoned gold mine site: confirmation of previous observations // Journal of Geochemical Exploration. 2017. Vol. 181. P. 129–137. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.07.004.

12. Arifin Y. I., Sakakibara M., Takakura S., Jahja M., Lihawa F., Sera K. Artisanal and small-scale gold mining activities and mercury exposure in Gorontalo Utara Regency, Indonesia // Toxicological & Environmental Chemistry. 2020. Vol. 102. Iss. 10. P. 521–542. https://doi.org/10.1080/02772248.2020.1839074.

13. Mantey J., Nyarko K. B., Owusu-Nimo F., Awua K. A., Bempah C. K., Amankwah R. K., Akatu W. E., et al. Mercury contamination of soil and water media from different illegal artisanal small-scale gold mining operations (galamsey) // Heliyon. 2020. Vol. 6. Iss. 6. P. e04312. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04312.

14. Mashyanov N. R., Pogarev S. E., Panova E. G., Panichev N., Ryzhov V. Determination of mercury thermo-species in coal // Fuel. 2017. Vol. 203. P. 973–980. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.085.

15. Табаксблат Л. С., Бизяев Н. А. Гидрогеохимическая трансформация Липовского месторождения силикатного никеля (Средний Урал) в условиях регрессивной стадии его техногенеза // Литосфера. 2008. № 6. С. 73–81.

16. Пахомов В. П. Охрана окружающей среды при разработке золотороссыпных месторождений // Колыма. 1986. № 10. С. 30–32.

17. Тейлор С. Р., Мак-Леннан С. М. Континентальная кора: ее состав и эволюция / пер. с англ. Р. Н. Соболева, Л. Т. Соболевой. М.: Мир, 1988. 384 с.

18. Павлова Л. М., Радомская В. И., Юсупов Д. В. Высокотоксичные элементы в почвенном покрове на территории г. Благовещенска // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 5. С. 50–55.

19. Павлова Л. М., Радомская В. И., Юсупов Д. В. Высокотоксичные элементы в снежном покрове на территории г. Благовещенска // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2015. № 1. С. 27–35.

20. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях / пер. с англ. Д. В. Гричук, Е. П. Янин. М.: Мир, 1989. 439 с.

21. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды. М.: Гидрометеоиздат, 1984. 560 с.

22. Робертус Ю. В., Рихванов Л. П., Ляпина Е. Е., Любимов Р. В., Юсупов Д. В., Осипова Н. А. Формы нахождения и переноса ртути в компонентах экосистем Горного Алтая // Химия в интересах устойчивого развития. 2018. Т. 26. № 2. С. 185–192. https://doi.org/10.15372/KhUR20180209.

23. Таусон В. Л., Гелетий В. Ф., Меньшиков В. И. Уровни содержания, характер распределения и формы нахождения ртути как индикаторы источников ртутного загрязнения природной среды // Химия в интересах устойчивого развития. 1995. Т. 3. № 1-2. С. 151–159.

References

1. Eirish L. V. Some geologic-geomorphological features of formation of gold-bearing placers in Priamurye. *Tikhookeanskaya geologiya*. 2008;27(5):104-114. (In Russ.).

2. Bubnova M. B. Method of integral assessment of the level of environmental pollution under development of non-ferrous and rare metals deposits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2006;4:86-91. (In Russ.).

3. Zelinskaya E. V., Gorbunova O. I., Shcherbakova L. M. Environmental impact of placer mining. *Gornyi zhurnal*. 1998;5:27-28. (In Russ.).

4. Pashkevich M. A. *Technogenic masses and their environmental impact.* Saint Petersburg: Saint Petersburg Mining University; 2000. 229 p. (In Russ.).

5. Saksin B. G. Forecast ecological evaluation of the regional effect of rare and non-ferrous metal mining on the environment in eastern Russia. *Tikhookeanskaya geologiya*. 2008;27(5):115-123. (In Russ.).

6. Trubetskoi K. N., Galchenko Yu. P., Burtsev L. I. *Environmental problems of subsoil development in sustainable development of nature and society*. Moscow: Nauchtekhlitizdat; 2003. 261 p. (In Russ.).

7. Ngure V., Davies T, Kinuthia G., Sitati N., Shisia S., Oyoo-Okoth E. Concentration levels of potentially harmful elements from gold mining in Lake Victoria Region, Kenya: environmental and health implications. *Journal of Geochemical Exploration.* 2014;144:511-516. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.04.004.

8. Koval' A. T., Pavlova L. M., Radomskaya V. I., Radomskii S. M., Kuimova N. G., Krylov A. V. Mercury in ecosystems of the Amur Region. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk = Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2002;4:94-103. (In Russ.).

9. Laperdina T. G., Tupyakov A. V., Egorov A. I., Mel'nikova M. V., Askarova O. B., Banshchikov V A., et al. Mercury pollution of environment in the zones affected by gold mining enterprises of Transbaikalia. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya*. 1995;3(1-2):57-67. (In Russ.).

10. Koval' A. T., Sidorov Yu. F., Nagornyi V. A., Ostapchuk V. I. Technogenic pollution by metallic mercury in gold mining areas of the Amur region and Khabarovsk krai. In: *Dobycha zolota. Problemy i perspektivy: doklady nauchno-prakticheskogo seminara = Gold mining. Problems and prospects: reports of the scientific and practical seminar*. Khabarovsk; 1997. p.347-352. (In Russ.).

11. Yun S.-W., Kim D.-H., Kang D.-H., Son J., Lee S.-Y., Lee C.-K., et al. Effect of farmland type on the transport and spatial distribution of metal(loid)s in agricultural lands near an abandoned gold mine site: confirmation of previous observations. *Journal of Geochemical Exploration*. 2017; 181:129-137. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.07.004.

12. Arifin Y. I., Sakakibara M., Takakura S., Jahja M., Lihawa F., Sera K. Artisanal and small-scale gold mining activities and mercury exposure in Gorontalo Utara Regency, Indonesia. *Toxicological & Environmental Chemistry*. 2020;102(10):521-542. https://doi.org/10.1080/02772248.2020.1839074.

13. Mantey J., Nyarko K. B., Owusu-Nimo F., Awua K. A., Bempah C. K., Amankwah R. K., Akatu W. E., et al. Mercury contamination of soil and water media from different illegal artisanal small-scale gold mining operations (galamsey). *Heliyon*. 2020;6(6):e04312. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04312.

14. Mashyanov N. R., Pogarev S. E., Panova E. G., Panichev N., Ryzhov V. Determination of mercury thermo-species in coal. *Fuel*. 2017;203:973-980. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.085.

15. Tabaksblat L. S., Bizyaev N. A. Hydrogeochemical transformation of Lipovsky silicate nickel deposit (Middle Urals) in conditions of its regressive stage technogenesis. *Litosfera = Lithosphere (Russia)*. 2008;6:73-81. (In Russ.).

16. Pakhomov V. P. Environmental protection under development of gold-placer deposits. *Kolyma*. 1986;10:30-32. (In Russ.).

17. Taylor S. R., McLennan S. M. The continental crust: its composition and evolution. 1988. 384 p. (Russ. ed.: *Kontinental'naya kora: ee sostav i evolyutsiya*. Moscow: Mir; 1988. 384 p.).

18. Pavlova L. M., Radomskaya V. I., Yusupov D. V. High-toxic elements in soil cover at the territory of Blagoveshchensk. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2015;19(5):50-55. (In Russ.).

19. Pavlova L. M., Radomskaya V. I., Yusupov D. V. Highly toxic elements in snow cover in the Blagoveshchensk territory. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2015;1:27-35. (In Russ.).

20. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. 1989. 439 p. (Russ. ed.: *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh*. Moscow: Mir; 1989. 439 p.).

21. Izrael' Yu. A. *Ecology and monitoring of environment condition*. Moscow: Gidrometeoizdat; 1984. 560 p. (In Russ.).

22. Robertus Yu. V., Rikhvanov I. P., Lyapina E. E., Lyubimov R. V., Yusupov D. V., Osipova N. A. Forms of Occurrence and Transfer of Mercury in Components of Ecosystems of Gorny Altai. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya*. 2018;26(2):185-192. https://doi.org/10.15372/KhUR20180209. (In Russ.).

23. Tauson V. L., Geletii V. F., Men'shikov V. I. Content levels, distribution nature and forms of mercury as indicators of mercury pollution sources of environment. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya*. 1995;3(1-2): 151-159. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors

Радомская Валентина Ивановна,
кандидат химических наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории биогеохимии,
Институт геологии и природопользования ДВО РАН,
г. Благовещенск, Россия,
radomskaya@ascnet.ru,
https://orcid.org/0000-0002-3023-7565.
Valentina I. Radomskaya,
Cand. Sci. (Chem.),
Leading Researcher of the Laboratory of Biogeochemistry,
Institute of Geology and Nature Management,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Blagoveshchensk, Russia,
radomskaya@ascnet.ru,
https://orcid.org/0000-0002-3023-7565.

Радомский Сергей Михайлович,
кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник Лаборатории рудогенеза,
Институт геологии и природопользования ДВО РАН,
г. Благовещенск, Россия,
rsm@ascnet.ru,
https://orcid.org/0000-0002-8522-5510.
Sergey M. Radomskiy,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Researcher of the Ore Genesis Laboratory,
Institute of Geology and Nature Management,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Blagoveshchensk, Russia,
rsm@ascnet.ru,
https://orcid.org/0000-0002-8522-5510.

Сегренев Александр Сергеевич,
младший научный сотрудник,
руководитель Лаборатории элементного и химического анализа
Институт геологии и природопользования ДВО РАН,
г. Благовещенск, Россия,
a-chemist@mail.ru.
Alexander S. Segrenev,
Junior Researcher,
Head of the Laboratory for Elemental and Chemical Analysis,
Institute of Geology and Nature Management,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Blagoveshchensk, Russia,
a-chemist@mail.ru.

Кулик Софья Яновна,
студентка,
Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена,
г. Санкт-Петербург, Россия,
Sofyanka20011@mail.ru.
Sofya Ya. Kulik,
Student,
Herzen University,
Saint Petersburg, Russia,
Sofyanka20011@mail.ru.

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 19.07.2021; одобрена после рецензирования 20.10.2021; принята к публикации 26.11.2021.
The article was submitted 19.07.2021; approved after reviewing 20.10.2021; accepted for publication 26.11.2021.