

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЭКОСФЕРЫ ОТ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА

К.А. Колобанов^{1,2}, М.Ю. Филатова^{1,2}, М.Б. Бубнова³, Е.А. Ромашкина¹

¹ Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия, e-mail: kolobanov.92@mail.ru

² Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, Хабаровск, Россия

³ Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск, Россия

Аннотация: Изложены результаты исследования проблемы техногенного загрязнения экосистемы с использованием математического аппарата. Изучение этих вопросов проведено в границах влияния природно-горнопромышленной системы, сформированной деятельностью закрытого в настоящее время горного предприятия «Хрустальный ГОК» в Приморском крае Дальневосточного федерального округа РФ. Интенсивное техногенное загрязнение окружающей среды обусловлено освоением оловянных руд и накоплением большого количества отходов переработки, складированных в хвостохранилище «Высокогорское», объекте нашего исследования, расположенного на площади 17 га, изъятых из фонда лесных земель, с объемом отходов более 1 млн т. Аналитический обзор данных из литературных источников свидетельствует о слабой изученности проблемы геоэкологической оценки влияния техногенной системы на окружающую среду с использованием математического моделирования. В связи с этим целью исследования является оценка техногенного загрязнения экосферы в границах влияния природно-горнопромышленной системы с применением математического аппарата для снижения негативного воздействия этого влияния. Показано, что образующиеся ореолы и потоки загрязняющих веществ распространяются природными миграционными механизмами и происходит техногенное загрязнение экосистем, в том числе почв, и ухудшение качества среды обитания. Высокие концентрации валовых форм соединений тяжелых металлов, превышающие фоновые содержания и предельно допустимые концентрации (ПДК) от 3 до нескольких сотен раз, обнаружены в почвах, в границах влияния отходов хвостохранилища. Доказано, что чрезвычайная сложность почв и недостаточность изученности механизмов многих происходящих в них процессов сдерживают изучение закономерностей распространения в них загрязняющих веществ (ЗВ). Поэтому для исследуемого района была сформулирована и решена абстрактная задача накопления токсичных элементов в почвенном покрове, как в растворимых, так и в нерастворимых формах с использованием математического аппарата. Изучение процесса переноса и накопления ЗВ с использованием математического аппарата показывает, что их концентрация в почвах непостоянна и находится в прямой зависимости от времени. Проведенные расчетные эксперименты позволяют утверждать, что снижение, например, концентрации соединений Zn в почвах до уровня ПДК в районе исследования произойдет через 20 лет после поступления загрязняющих веществ в почву.

Ключевые слова: техногенное загрязнение, воздушный бассейн, техногенная система, математическое моделирование, хвостохранилище, отходы переработки, загрязняющие вещества.

Благодарность: Публикация выполнена при поддержке Государственного задания Минобрнауки РФ в сфере научной деятельности ФГБОУ ВО Тихоокеанский государственный университет, проект научной тематики, шифр 0818-2020-0004.

Для цитирования: Колобанов К.А., Филатова М.Ю., Бубнова М.Б., Ромашкина Е.А. Совершенствование методов оценки загрязнения экосферы от горнопромышленных отходов с использованием математического аппарата // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 4. – С. 85–99. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_85.

Improving valuation of ecosphere pollution from mining waste using mathematical tools

K.A. Kolobanov^{1,2}, M.Yu. Filatova^{1,2}, M.B. Bubnova³, E.A. Romashkina¹

¹ Pacific National University, Khabarovsk, Russia, e-mail: kolobanov.92@mail.ru

² Far East Forestry Research Institute, Khabarovsk, Russia

³ Mining Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

Abstract: The article reports studies into mining-induced pollution of the ecosphere using mathematical tools. The studies were carried out within the influence zone of the nature-and-technology system generated in the course of activity of the recently closed project, namely, Khrustalny Mining-and-Processing Plant in the Far Eastern Federal District of Russia. Heavy induced pollution of the environment is conditioned by tin ore production and accumulation of huge quantity of processing waste in Vysokogorskoe tailings storage, which is the subject of the present research, in volume of more than 1 Mt inside the area of 17 ha withdrawn from wooded lands. The relevant literature review discloses poor study of the problem connected with geo-ecological evaluation of the environmental impact of a manmade system using the mathematical modeling. In this connection, the present study is aimed to evaluate induced pollution of the ecosphere within the influence zone of a nature-and-technology system to abate the environmental impact using mathematical tools. The envelopes and flows of pollutants spread by the mechanisms of natural migration results in the induced pollution of ecosystems, including soil, and in the living space degradation. High concentrations of total compounds of heavy metals, which exceed the background contents and the maximal allowable concentrations by 3 to a few hundred times, are identified in soil within the influence zone of the tailings storage. It is proved that the extreme difficulty of soil and the insufficient study of mechanisms of many processes running in soil impede the analysis of propagation mechanisms of pollutants. Therefore, for the study region, an abstract problem is formulated and solved on accumulation of toxic elements in soil cover, both in soluble and insoluble forms, using mathematical tools. The studies into transfer and accumulation of pollutants using mathematical tools show that concentration of the pollutants in soil is variable and directly depends on time. The calculations make it possible to state that reduction in, for example, Zn concentrations down to MAC values in the study region can take place 20 years after the pollutants penetrate soil.

Key words: induced pollution, air basin, manmade system, mathematical modeling, tailings storage, processing waste, pollutants.

Acknowledgements: The study was carried out under the state contract between the Ministry of Education and Science of the Russian Federation and the Pacific National University, Science Project Code 0818-2020-0004.

For citation: Kolobanov K.A., Filatova M. Yu., Bubnova M. B., Romashkina E.A. Improving valuation of ecosphere pollution from mining waste using mathematical tools. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(4):85-99. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_85.

Введение

Интенсивное техногенное загрязнение окружающей среды в Дальневосточном федеральном округе (ДФО), в частности в границах влияния закрытого горного предприятия «Хрустальненский ГОК» Приморского края, обусловлено освоением оловянных руд и накоплением большого количества отходов переработки, складированных в хвостохранилища. Их воздействие на атмосферу, литосферу и гидросферу привело к загрязнению воздушного бассейна, почвы, биоты, поверхностных и грунтовых вод широким спектром элементов рудных составляющих, которые практически все токсичны.

В.Н. Опарин и др. [1], Л.Т. Крупская и др. [2] считают, что для решения этих вопросов важными являются разработка новых принципов и методов оценки состояния окружающей среды, изучение закономерностей взаимодействия литосферы и биосферы с учетом хозяйственной деятельности человека в ДФО. Решение проблемы оценки современного состояния окружающей среды и влияния на нее хозяйственной деятельности, в том числе горнодобывающей и горноперерабатывающей промышленности, является одной из современных задач геоэкологических исследований, что позволяет оптимизировать природопользование и выработать меры по устойчивому развитию региона. В.Н. Опарин с соавторами [1] предлагают оценить загрязнение воздуха с помощью комплексного инструментального мониторинга, расчетов и дистанционного зондирования.

Исследования В.П. Зверевой и др. [3] и Л.Т. Крупской и др. [4] свидетельствуют о том, что в результате гипергенных процессов происходит преобразование первичных минеральных веществ и высвобождение токсичных элементов и их соединений в окружающую среду.

М.Б. Бубнова и Ю.А. Озарян [5] считают, что организация и проведение регионального горно-экологического мониторинга в пределах природно-горно-технических систем позволяет получать всю необходимую информацию для разработки эффективных мероприятий по минимизации интегрального воздействия совокупности горных предприятий на природные компоненты, как в текущий период, так и в перспективе.

Изучение проблемы распространения соединений тяжелых металлов в процессе добычи угля проведены Л.Н. Пуртовой и др. [6]. Ими был рассмотрен процесс зарастания угольных шахт после рекультивации. Л.Т. Крупской с соавторами [7] определен уровень техногенной нагрузки на экосферу в условиях оловорудных горных предприятий Кавалеровского и Дальнегорского районов Приморского края и разработаны мероприятия по реабилитации территорий, подвергшихся воздействию объектов накопленного экологического ущерба.

В Горном институте Кольского научного центра Российской академии наук исследователями С.П. Месяц и С.П. Остапенко предложен экологический мониторинг с использованием спутниковых снимков [8]. Данный способ эффективен и наглядно отображает состояние окружающей среды в реальном времени. В Дальневосточном федеральном округе картографическое моделирование применяется сотрудниками Института горного дела ДВО РАН [9], зарегистрировавшими в 2019 г. базу данных, содержащую разномасштабные карты рельефа, позволяющие оценить поле напряжений в рудных районах на основе интерпретации спутниковых снимков Landsat8 и свободной географической информационной системы с открытым доступом QuantumGIS [10]. По мнению авторов, дальнейшие исследования оценки влияния загрязнения на окружающую

щую среду будут продолжены с использованием математических моделей.

Результаты изучения названной проблемы зарубежными исследователями из разных стран свидетельствуют об их актуальности. Например, M. Idrees и другими предложены различные способы оценки влияния техногенного загрязнения окружающей среды вблизи населенных пунктов Пакистана [11].

Zhe Zhu и другими разработан новый алгоритм непрерывного мониторинга нарушенных земель [12]. Исследования распространения соединений тяжелых металлов в процессе добычи и переработки полиметаллических руд были проведены испанскими учеными (M.T. Gomez-Sagasti и др.) [13]. Ими разработан метод восстановления почв за счет фиторемедиации посредством фитозакрепления и фитостабилизации.

Исследователи из Индии Alok Bhargava и др. [14] занимались изучением влияния загрязнения окружающей среды на рост и развитие биологических популяций с использованием математических моделей. Ученые из Ирана F. Doulati Ardejani (Ph.D.) и др. [15] занимались проблемой загрязнения экосферы отходами угольных производств. Были построены математические модели переноса загрязняющих веществ, образующихся на месте складирования отходов. Бразильские ученые Vanessa Hatje с соавторами [16] изучали закономерности распространения соединений тяжелых металлов от отходов хвостохранилищ в объекты окружающей среды. Авторами охарактеризован процесс загрязнения воды, донных отложений, содержание взвешенных частиц в атмосфере. На основе полученных данных построены математические модели распространения загрязняющих веществ в окружающей среде. Ученые из Китая Renzhi Liu и др. [17] оценили риски загрязнения экосферы отходами горно-пере-

рабатывающих производств, складированных в хвостохранилища. Полученные результаты анализов позволяют получить полезную информацию для планирования возникновения возможных рисков и управления хвостохранилищами с точки зрения смягчения рисков и систем раннего предупреждения, разработки стратегий готовности к инцидентам.

Возможность применения математической модели в рамках доизвлечения полезных компонентов из хвостохранилищ рассмотрена в трудах румынского ученого Jason Phillips [18] для разработки эффективной стратегии управления окружающей средой.

Однако аналитический обзор литературных данных в условиях закрытого горного предприятия «Хрустальненский ГОК» Дальневосточного федерального округа свидетельствует о слабой изученности проблемы геоэкологической оценки влияния техногенной системы на окружающую среду с использованием математического моделирования. В связи с этим целью исследования является оценка техногенного загрязнения экосферы в границах влияния природно-горнопромышленной системы с применением математического аппарата для снижения негативного его воздействия.

Определены следующие задачи:

- проанализировать литературные источники по проблеме геоэкологической оценки экосферы в условиях горных предприятий;
- изучить современное состояние техногенной системы, сформированной прошлой деятельностью закрытого горного предприятия «Хрустальненский ГОК» на примере хвостохранилища «Высокогорское»;
- предложить методические подходы к оценке состояния окружающей среды с использованием математического аппарата.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования явилась природно-горнопромышленная система, представленная токсичными отходами переработки оловянных руд, складированными в хвостохранилища, и компоненты окружающей среды.

Исследования проведены в течение 2017–2019 гг. в границах влияния хвостохранилищ закрытого горного предприятия «Хрустальненский ГОК», вблизи горняцкого поселка Высокогорск Кавалеровского района Приморского края. В работе использован следующий комплекс основных методов и методических приемов: системного анализа и обобщения теоретических и экспериментальных исследований, научного прогнозирования, ГИС-технологий, картографического и математического моделирования, статистической обработки эмпирических данных. При выполнении работы нашли применение современные инструментальные и традиционные физико-химические, химические и биологические методы.

Отбор техногенных почвогрунтов проводился с разных глубин (0–10 см и 10–20 см). Проведено морфологическое описание почв и техногенных почвогрунтов с разных глубин (0–10 см и 10–20 см) с учетом ГОСТ 17.4.3.01-83, ГОСТ 17.4.4.02-84, а растительности — ГОСТ 27262-87. При этом учтена роза ветров.

Отобранные образцы почвогрунтов методом конверта (координаты точек: Т. 1. N44°24'11,08"; E135°25'14,07"; Т. 2. N44°24'09,64"; E135°25'05,62"; Т. 3. N44°24'11,81"; E135°25'09,18"; Т. 4. N44°24'12,54"; E135°25'21,68"; Т. 5. N44°24'09,07"; E135°25'21,53") анализировались методом атомно-абсорбционной спектроскопии на ААs-30 и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на ISP-MS ELASN DRC II PerkinElmer в Хабаровском ин-

новационно-аналитическом центре Института тектоники и геофизики ДВО РАН по «Методике кислотного разложения проб пыли» на содержание химических элементов (Cr, Cu, Zn, As, Sb, Pb).

Для оценки экологического состояния объектов окружающей среды рассчитывался суммарный показатель загрязнения (Z_c) (1):

$$Z_c = \sum K_c - (n-1) \quad (1)$$

где K_c — коэффициенты концентрации элементов, показывающие отношение содержания элементов в пробах к фоновым концентрациям; n — число элементов.

Оценка опасности загрязнения почв соединениями токсичных ТМ по показателю Z_c проведена по оценочной шкале, градации которой разработаны на основе изучения состояния здоровья населения, проживающего на территориях с различным уровнем загрязнения почв.

Полученные количественные показатели обработаны математически на персональном компьютере с помощью прикладных программ, в основу которых положены методы вариационной статистики, с поиском корреляционных связей.

Результаты и обсуждение

Накопленный значительный опыт сбора и анализа информации по проблеме современного состояния разработки вопросов геоэкологической оценки экосферы, влияния отходов переработки минерального сырья на окружающую среду свидетельствует о том, что синтеза этих знаний нет [19, 20 и др.]. Поэтому существующие методы оценки воздействия горного производства на объекты природной среды не могут обеспечить полномасштабную защиту окружающей среды [21–27 и др.]. Аналитический обзор показал, что практически не изучены в условиях горных предприятий ДФО вопросы геоэкологической оценки

влияния техногенной системы на окружающую среду с использованием математического аппарата, и ее методология требует дальнейшего развития и совершенствования. Добыча и переработка оловянных руд в Кавалеровском районе началась в 1930-е годы открытым и подземным способами. Отходы переработки оловянной руды складированы в хвостохранилище, расположенном вдоль руч. Ветвистого, протекающего через все сельское поселение Высокогорск и занимают площадь около 17 га, изъятую из фонда лесных земель, с объемом отходов 1 млн т. В целом отходы на поверхности хвостохранилища по результатам проведенных расчетов относятся ко второму классу опасности (высокоопасные) и являются мощным негативным фактором воздействия на окружающую среду [28].

Материалы исследования в границах влияния хвостохранилища свидетельствуют о том, что в процессе освоения оловянных руд образующиеся ореолы и потоки загрязняющих веществ распространяются природными миграционными механизмами и происходит техногенное загрязнение окружающей среды, в том числе почв, и ухудшение качества среды обитания [29, 30 и др.]. Данные показывают, что прошла хозяйственная деятельность при освоении месторождений полезных ископаемых предприятием «Хрустальненск ГОК» в Кавалеровском районе Приморского края способствовала масштабному разрушению почвенного покрова на значительной территории региона и формированию специфических техногенно-нарушенных площадей. ЗВ, содержащиеся в отходах, в том числе соединения тяжелых металлов (ТМ), в больших количествах выносятся из техногенной системы с помощью рудничных, шламовых, поровых вод в поверхностные и грунтовые воды, что способствует изменению геохимиче-

ского фона района исследования [31]. Высокие концентрации валовых форм соединений тяжелых металлов, превышающие фоновые содержания и ПДК в несколько раз (от 3 до нескольких сотен раз), обнаружены в почвах в границах влияния отходов хвостохранилища. Установлено превышение ПДК в почвах для соединений Zn, As, Cu, Pb, Sb и др. Аномальные количества соединений Zn, Cu, Pb и др. фиксируются не только в верхнем слое почв (0–10 см), но и на глубине 10–20 см.

Для изучения миграции загрязняющих веществ от отходов в почвы проведен анализ почв исследуемого района. Хвостохранилище Высокогорское приурочено к бурым лесным, слабонасыщенным почвам и литосолям [32]. Фундаментом их служат слабовыветренные тяжелосуглинистые элювиальные сланцы, магматические породы и третичные сланцевые глины. Профиль бурых лесных слабонасыщенных почв состоит из следующих горизонтов: рыхлая подстилка из опада (толщиной до 2 см); грубогумусный (толщиной от 2 до 6 см); гумусовый (толщиной до 10 см); переходный (толщиной до 20 см); метаморфический (толщиной от 40 до 65 см); почвообразующий щебнистый. В свою очередь литосоли — это примитивно-щебнистые, грубоскелетные, фрагментные, горные каменные почвы. В гумусовых слоях бурых лесных слабонасыщенных почв содержится до 12% гумусовых компонентов. Количество составляющих их фульвокислот превышает объем гуминовых в верхних горизонтах. А в нижних слоях профиля наблюдается обратная ситуация. По показателям уровня кислотности такие грунты определяются как слабокислые. Данные типы почв не препятствуют быстрому проникновению загрязняющих веществ в более глубокие почвенные горизонты, в том числе вместе с по-

ступающими осадками. Карта района исследования и некоторые его климатические характеристики представлены на рис. 1.

Из различных источников [33, 34] можно сделать вывод, что наиболее значимым фактором в процессе сорбции, и соответственно, миграции некоторых соединений ТМ, например, мышьяка, является температурный. Увеличение температуры приводит к увеличению скорости физического взаимодействия соединений мышьяка с активными центрами грунта. В свою очередь, кислотность почвы не ведет к существенным изменениям процесса сорбции.

Несомненно, интенсивность миграции соединений ТМ в техногенных почвах зависит от содержания органическо-

го вещества. Его количество в исследуемых почвах (на разной глубине отбора), соответственно, колеблется от 0,6 до 3–5%. При увеличении содержания гумуса подвижность соединений Zn, Cu, Pb, и др. химических элементов снижается, а количество валовой формы металлов возрастает, что подтверждается исследованиями Н.Л. Байдиной и др. [35].

Необходимо отметить, что чрезвычайная сложность почв и недостаточность изученности механизмов многих происходящих в них процессов сдерживают изучение закономерностей распространения в них ЗВ. Для исследуемого района была сформулирована и решена абстрактная задача накопления токсичных элементов в почвенном по-

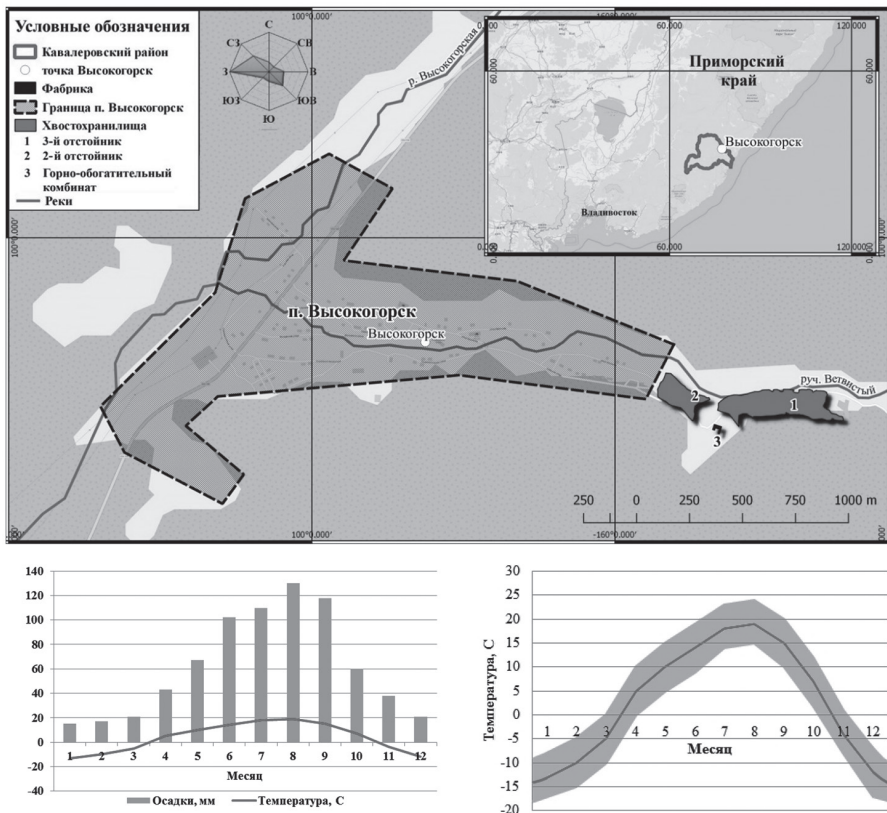


Рис. 1. Карта и климатические характеристики района исследования

Fig. 1. Map and climatic characteristics of the study area

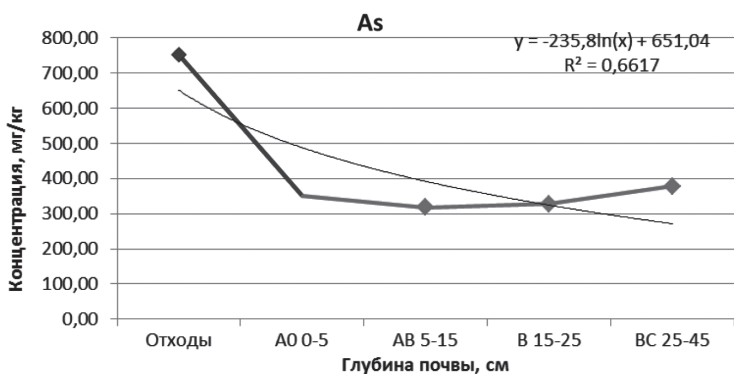


Рис. 2. Миграция соединений As в почвенных горизонтах исследуемого района в границах влияния горного предприятия «Дальполиметалл»

Fig. 2. Migration of As compounds in the soil horizons of the study area within the influence of the Dalpolymetal mining enterprise

кроме как в растворимых, так и в нерастворимых формах (рис. 2).

Разумеется, в реальном случае будет накапливаться множество токсичных ЗВ, но это обстоятельство не повлияет на содержание гидродинамической модели. Миграция токсичных загрязняющих веществ в пределах исследуемого района будет осуществляться как воздушными, так и водными потоками, т.е. в зависимости от гидрометеорологических условий и особенностей рыхлого покрова. По отношению к экологически напряженному району потоки загрязнителей будут сквозными — проникающими, с частичной разгрузкой. И если дисперсную структуру рассматривать как некоторый бассейн — емкость со слабо очерченными границами, то можно ввести понятия подпитки и слива. Наиболее важной причиной роста концентрации загрязнений в обводненных почвах является испарение воды с поверхности грунта. Водные растворы ЗВ, концентрация которых в результате испарения чистой воды растет, становятся более сильными реагентами, чем поступающие в бассейн.

Для вывода дифференциального уравнения кинетики загрязнения были применены понятия дебита источника $C_0 q_n$

и дебита стока $C q_c$ загрязняющего вещества (2):

$$\begin{cases} {}_0 q_n = \sum_{i=1}^n C_i q_i \\ q_c = \sum_j^m q_j \end{cases}, \quad (2)$$

где C_0 — средневзвешенное содержание загрязняющего вещества в капельной и газообразной жидкости подпитки; q_n — суммарный расход подпитки; C — текущее значение содержания загрязняющего вещества в обводненной почве; q_c — суммарный расход слива.

Из уравнения материального баланса получаем дифференциальное уравнение кинетики загрязнения (3) первого порядка с разделяющимися переменными:

$$dt = V \frac{dC}{C_0 q_n - C q_c}. \quad (3)$$

После преобразования получаем формулу (4), которая является математической моделью распространения загрязняющих веществ в почвах исследуемого района:

$$C = C_0 \exp\left(-q_c \frac{t}{V}\right), \quad (4)$$

где C_0 — средневзвешенное содержание загрязняющего вещества в капельной и газообразной жидкости подпитки; q_c — суммарный расход слива; V — объем

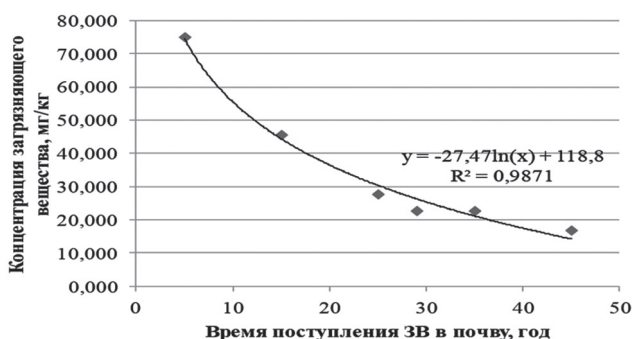


Рис. 3. Прогноз содержания Zn в почве

Fig. 3. Forecast of Zn content in soil

бассейна; t — время поступления загрязняющего вещества в почву.

Изучение процесса переноса и накопления ЗВ с использованием математической модели показывает, что их концентрация в почвах непостоянна и находится в прямой зависимости от времени.

Проведенные расчетные эксперименты с использованием математического аппарата позволяют утверждать, что сни-

жение, например, концентрации соединений Zn в почвах до уровня ПДК произойдет не ранее, чем через 29 лет после поступления загрязняющих веществ в почвы (рис. 3). Суммарный показатель загрязнения (Z_c) в техногенных почвах с увеличением расстояния от техногенного источника снижается (рис. 4).

Результаты проведенных исследований (таблица) подтверждают сделанные выше выводы: с течением времени кон-

Среднее валовое содержание загрязняющих веществ в почвах на различной глубине (отобранные в пятикратной повторности), мг/кг

Average gross content of pollutants at different depths (selected in five replicates), mg/kg

Глубина, см	Cr	Cu	Zn	As	Sb	Pb
0–20	17,49	405,71	96,40	496,01	9,58	143,28
A0 0–5	62,50	134,25	82,90	350,48	8,13	94,53
AB 5–15	11,73	91,52	53,76	317,27	6,91	88,04
B 15–25	13,04	137,98	83,73	328,31	6,22	88,63
BC 25–45	13,26	115,12	64,26	377,86	7,38	89,37

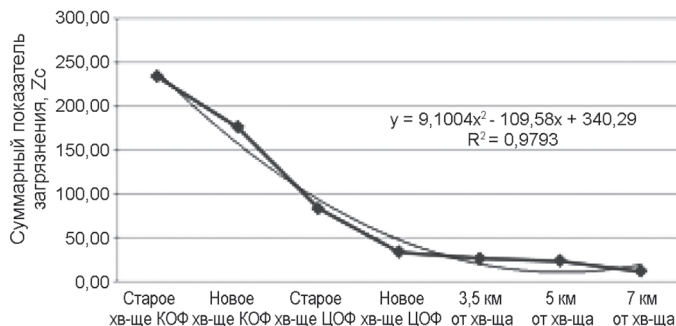


Рис. 4. Суммарный показатель загрязнения (Z_c) в техногенных почвах

Fig. 4. The total indicator of pollution (Z_c) in technogenic soils

центрация загрязняющих веществ, поступающих в почву, уменьшается, но в то же время происходит ее накопление в более глубоких почвенных горизонтах.

Заключение

Исследователями в основу оценки техногенного загрязнения почв тяжелыми металлами положена количественная характеристика их элементного состава. Степень загрязнения почвенно-растительного покрова определяется величиной накопления загрязняющих веществ относительно показателей ПДК или фоновых значений. Накопленный огромный опыт сбора и анализа информации по проблеме современного состояния разработки вопросов геоэкологической оценки окружающей среды, влияния отходов переработки минерального сырья на окружающую среду свидетельствует о том, что синтез этих знаний, позволяющих подойти к геоэкологической оценке их воздействия на экосистемы, нет. Выявлены природно-климатические особенности района исследования, влияющие на закономерности распространения загрязняющих веществ в окружающей среде. Проанализировано современное

состояние техногенной системы. Отходы переработки полиметаллических руд закрытого горного предприятия «Хрустальненский ГОК», являясь источником загрязнения окружающей среды, способствуют интенсивному техногенному ее загрязнению. Расчет класса опасности отходов показал, что они относятся ко второму классу опасности (высокоопасные) [28].

Результаты исследования показали, что загрязнение почв отходами переработки минерального сырья в границах влияния хвостохранилища (техногенной системы) «Высокогорское» бывшего предприятия «Хрустальненский ГОК» — соединениями тяжелых металлов — относится к экстремально высокому уровню.

Полученная математическая модель распространения загрязняющих веществ в почве и проведенные расчетные эксперименты способствуют улучшению методов оценки загрязнения почвы и позволяют не только выявить пространственные закономерности распределения основных загрязняющих веществ в ней, но и дают возможность оценить временные рамки возможного экологического ущерба экосфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oparin V. N., Potapov V. P., Giniyatullina O. L., Bykov A. A., Schastlivtsev E. L.* Integrated monitoring of induced air pollution in mining regions // *Journal of Mining Science*. 2017. Vol. 53. No 5. Pp. 945 – 953. DOI: 10.1134/S1062739117052982.

2. *Крупская Л. Т., Зверева В. П., Леоненко А. В.* Особенности экологического мониторинга изменения объектов окружающей среды в процессе золотодобычи / *Materialy IX Mezinarodni Vedecko-Prakticka Conference «Moderni Vymozenosti Vedy–2013»*. 2013. Pp. 67 – 76.

3. *Зверева В. П., Костина А. М., Коваль О. В.* Техногенное минералообразование как показатель экологического состояния оловорудных районов Дальнего Востока // *Горный журнал*. – 2009. – № 4. – С. 41 – 43.

4. *Крупская Л. Т., Мелконян Р. Г., Зверева В. П., Растанина Н. К., Голубев Д. А., Филатова М. Ю.* Опасность отходов, накопленных горными предприятиями в Дальневосточном федеральном округе, для окружающей среды и рекомендации по снижению риска экологических катастроф // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2018. – № 12. – С. 102 – 112. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-102-112.

5. *Bubnova M. B., Ozaryan Y. A.* Integrated assessment of the environmental impact of mining // *Journal of Mining Science*. 2016. Vol. 52. No 2. Pp. 401 – 409.

6. Пуртова Л. Н., Костенков Н. М., Верхолат В. П. Почвенно-растительный мониторинг на техногенных ландшафтах Приморья (на примере рекультивируемых участков угольных шахт) // *Фундаментальные исследования*. — 2013. — № 11. — С. 108–114.

7. Крупская Л. Т., Мелкоян Р. Г., Майорова Л. П., Голубев Д. А. Экологической реабилитации территорий, подвергшихся воздействию объектов накопленного экологического ущерба (хвостохранилищ) в результате прошлой хозяйственной деятельности бывших горных предприятий в Дальневосточном федеральном округе (ДФО) // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2017. — № 4. — С. 5–15.

8. Месяц С. П., Остапенко С. П. Методический подход к мониторингу восстановления нарушенных земель горнопромышленной отрасли по данным спутниковых наблюдений // *Горная промышленность*. — 2018. — № 6 (142). — С. 72–75. DOI: 10.30686/1609-9192-2018-6-142-72-75.

9. Липина Л. Н., Бубнова М. Б., Усиков В. И. Использование дистанционного зондирования земли для оценки геоэкологической ситуации в горнорудных районах Дальневосточного региона // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2017. — № 523. — С. 517–524.

10. Усиков В. И., Липина Л. Н., Бубнова М. Б., Озарян Ю. А. Картографическая база данных MI-FE GIS. Свидетельство о регистрации базы данных 2019620201 РФ. 31.01.2019.

11. Idrees M., Jan F. A., Ara A., Gulab H. Analysis and human health risk from selected heavy metals in water, sediments and freshwater fish (*Labeo rohita*, *Cyprinus carpio*, *Glyptothorax punjabensis*) collected from three rivers in district Charsadda, Khyber-Pakhtunkhwa, Pakistan // *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*. 2017. Vol. 12. No 2. Pp. 641–648.

12. Zhe Zhu, Junxue Zhang, Zhiqiang Yang, Aljaddani A. H., Cohen W. B., Shi Qiu, Congliang Zhou Continuous monitoring of land disturbance based on Landsat time series // *Remote Sensing of Environment*. 2020, Vol. 238. Article 111116. DOI: 10.1016/j.rse.2019.03.009.

13. Gomez-Sagasti M. T., Alkorta I., Becerril J. M., Epelde L., Anza M., Garbisu C. Microbial monitoring of the recovery of soil quality during heavy metal phytoremediation // *Water Air Soil Pollut.* 2012. Vol. 223. Pp. 3249–3262. DOI: 10.1007/s11270-012-1106-8.

14. Bhargava A., Srivastava A., Mukherjee R. On a mathematical model involving I-function for studying the effect of environmental pollution // *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*. 2017. Vol. 87. No 1. Pp. 19–21. DOI: 10.1007/s40010-016-0319-4.

15. Ardejani F. D., Shokri B. J., Moradzadeh A., Soleimani E., Jafar M. A. A combined mathematical geophysical model for prediction of pyrite oxidation and pollutant leaching associated with a coal washing waste dump // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2008. Vol. 5. No 4. Pp. 517–526.

16. Hatje V., R. M. A. Pedreira, de Rezende C. E., Augusto C., Schettini F., de Souza G. C., Marín D. C., Hackspacher P. C. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide // *Scientific reports*. 2017, Vol. 7. Article 10706. DOI: 10.1038/s41598-017-11143-x.

17. Liu R., Liu J., Zhang Z., Borthwick A., Zhang K. Accidental water pollution risk analysis of mine tailings ponds in Guanting Reservoir Watershed, Zhangjiakou City, China // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015. Vol. 12. No 12. Pp. 15269–15284. DOI: 10.3390/ijerph121214983.

18. Phillips J. Applying a mathematical model of sustainability to the Rapid Impact Assessment Matrix evaluation of the coal mining tailings dumps in the Jiului Valley, Romania // *Resources, Conservation and Recycling*. 2012. Vol. 63. Pp. 17–25. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.03.003.

19. Трубецкой К. Н. Решение проблем экологически сбалансированного освоения месторождений открытыми геотехнологиями // *Горный журнал*. — 2018. — № 6. — С. 71–76.

20. Качурин Н. М., Стась Г. В., Калаева С. З. К., Корчагина Т. В. Геоэкологическая оценка эффективности защиты окружающей среды и природоохранных мероприятий

при подземной добыче угля // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2016. — № 3. — С. 63–81.

21. *Krupskaya L. T., Zvereva V. P., Panfilov O. O.* Estimation of environment pollution in zone of tailing dump influence in the south Far East of Russia and necessity of monitoring organization // *WIT Transactions on Engineering Sciences*. 2014. Vol. 88. Pp. 499–504.

22. *Gula K. E., Korneeva N. I., Krupskaya L. T., Zvereva V. P., Golubev D. A., Pavlichenko A. V.* Mathematical models of additional purification of sewage (in a form of pulp) on heavy metals using hydrophytes // *Russian Journal of General Chemistry*. 2015. Vol. 85. No 13. Pp. 2942–2944.

23. *Khanam A.* Phytoremediation. A green bio-engineering technology for cleanup the environmental contaminants // *International Journal of Recent Scientific Research*. 2016. Vol. 7. Pp. 9925–9928. DOI: 10.1134/S1070363215130113.

24. *Emamverdian A., Ding Y., Mokhberdorani F., Xie Y.* Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response // *The Scientific World Journal*. 2015. Article ID 756120. 18 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/756120>.

25. *Wolejko E., Wydro U., Loboda T.* The ways to increase efficiency of soil bioremediation // *Ecological Chemistry and Engineering*. 2016. Vol. 23. Pp. 155. DOI: 10.1515/eces-2016-0011.

26. Шаров П. О. Загрязнение свинцом пос. Рудная Пристань и его влияние на здоровье детей. — Владивосток: Дальнаука, 2005. — 132 с.

27. *Gifford F.* Use of Routine meteorological observations for estimating atmospheric dispersion // *Nuclear Safety*. 1961. Vol. 2. No 4. Pp. 47–51.

28. Майорова Л. П., Крупская Л. Т., Черенцова А. А., Филатова М. Ю. Оценка экологической ситуации в границах влияния хвостохранилищ Дальнегорского района Приморского края // *Экологическая химия*. — 2018. — Т. 27. — № 6. — С. 317–327.

29. *Kumpiene J., Desogus P., Schulenburg S., Arenella M., Renella G., Brdnnvall E., Lagerkvist A., Andreas L., Sjtblom R.* Utilisation of chemically stabilized arsenic-contaminated soil in a land fill cover // *Environmental Science and Pollution Research*. 2013. Vol. 20. No 12. Pp. 8649–8662. DOI: 10.1007/s11356-013-1818-3.


30. *Shrivastava A., Ghosh D., Dash A., Bose S.* Arsenic Contamination in Soil and Sediment in India: Sources, Effects, and Remediation // *Current Pollution Reports*. 2015. Vol. 1. No 1. Pp. 35–46. DOI: 10.1007/s40726-015-0004-2.

31. Раганина Н. К., Крупская Л. Т., Голубев Д. А., Черенцова А. А. Оценка риска для здоровья населения, связанного с техногенным загрязнением от отходов бывшего горного предприятия «Хрустальный ГОК» // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2017. — № 12. — С. 88–95. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-88-95.

32. Иванов Г. И. Особенности почвообразования на юге Дальнего Востока. — Новосибирск, 1973. — 45 с.

33. Качор О. Л. Разработка научно-практических основ ликвидации накопленного экологического ущерба от мышьяковистых отходов горно-перерабатывающей промышленности: Дис. ... докт. техн. наук. — Иркутск: ИРНТУ, 2019. — 407 с.

34. Качор О. Л. Разработка модели миграции мышьяка по почвенному профилю из накопленных отходов горно-перерабатывающей промышленности // *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. — 2019. — Т. 42. — № 2. — С. 144–150.

35. *Ilin V. B., Syso A. I., Baidina N. L., Konarbaeva G. A., Cherevko A. S.* Background concentrations of heavy metals in soils of southern western Siberia // *Eurasian Soil Science*. 2003. Vol. 36. No 5. Pp. 494–500. 

REFERENCES

1. Oparin V. N., Potapov V. P., Giniyatullina O. L., Bykov A. A., Schastlivtsev E. L. Integrated monitoring of induced air pollution in mining regions. *Journal of Mining Science*. 2017. Vol. 53. No 5. Pp. 945–953. DOI: 10.1134/S1062739117052982.

2. Krupskaya L.T., Zvereva V.P., Leonenko A.V. Features of environmental monitoring of changes in environmental objects in the process of gold mining. *Materialy IX Mezinarodni Vedecko-Prakticka Conference «Moderni Vymozenosti Vedy-2013»*. 2013. Pp. 67 – 76.

3. Zvereva V.P., Kostina A.M., Koval' O. V. Technogenic mineral formation as an indicator of the ecological state of tin ore regions of the Far East. *Gornyi Zhurnal*. 2009, no 4, pp. 41 – 43. [In Russ].

4. Krupskaya L.T., Melkonyan R.G., Zvereva V.P., Rastanina N.K., Golubev D.A., Filatova M. Yu. Ecological hazard of accumulated mining waste and recommendations on risk reduction in the Far Eastern Federal District. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no 12, pp. 102 – 112. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-102-112.

5. Bubnova M.B., Ozaryan Y.A. Integrated assessment of the environmental impact of mining. *Journal of Mining Science*. 2016. Vol. 52. No 2. Pp. 401 – 409.

6. Purtova L.N., Kostenkov N.M., Verkholat V.P. Soil and plant monitoring on the technogenic landscapes of Primorye (on the example of reclaimed sections of coal mines). *Fundamental'nyye issledovaniya*. 2013, no 11, pp. 108 – 114. [In Russ].

7. Krupskaya L.T., Melkonyan R.G., Mayorova L.P., Golubev D.A. Ecological rehabilitation of territories affected by accumulated environmental damage (tailings) as a result of past economic activities of former mining enterprises in the Far Eastern Federal District (FEFD). *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no 4, pp. 5 – 15. [In Russ].

8. Mesyats S.P., Ostapenko S.P. Methodological approach to monitoring the restoration of disturbed lands of the mining industry according to satellite observations. *Russian Mining Industry*. 2018, no 6 (142), pp. 72 – 75. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2018-6-142-72-75.

9. Lipina L.N., Bubnova M.B., Usikov V.I. The use of remote sensing of the earth to assess the geocological situation in the mining regions of the Far Eastern region. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no S23, pp. 517 – 524. [In Russ].

10. Usikov V.I., Lipina L.N., Bubnova M.B., Ozaryan Yu.A. *Patent RU 2019620201*, 31.01.2019.

11. Idrees M., Jan F.A., Ara A., Gulab H. Analysis and human health risk from selected heavy metals in water, sediments and freshwater fish (*Labeo rohita*, *Cyprinus carpio*, *Glyptothorax punjabensis*) collected from three rivers in district Charsadda, Khyber-Pakhtunkhwa, Pakistan. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*. 2017. Vol. 12. No 2. Pp. 641 – 648.

12. Zhe Zhu, Junxue Zhang, Zhiqiang Yang, Aljaddani A.H., Cohen W.B., Shi Qiu, Congliang Zhou Continuous monitoring of land disturbance based on Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*. 2020, Vol. 238. Article 111116. DOI: 10.1016/j.rse.2019.03.009.

13. Gomez-Sagasti M. T., Alkorta I., Becerril J. M., Epelde L., Anza M., Garbisu C. Microbial monitoring of the recovery of soil quality during heavy metal phytoremediation. *Water Air Soil Pollut.* 2012. Vol. 223. Pp. 3249 – 3262. DOI: 10.1007/s11270-012-1106-8.

14. Bhargava A., Srivastava A., Mukherjee R. On a mathematical model involving I-function for studying the effect of environmental pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India. Section A: Physical Sciences*. 2017. Vol. 87. No 1. Pp. 19 – 21. DOI: 10.1007/s40010-016-0319-4.

15. Ardejani F. D., Shokri B. J., Moradzadeh A., Soleimani E., Jafar M. A. A combined mathematical geophysical model for prediction of pyrite oxidation and pollutant leaching associated with a coal washing waste dump. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2008. Vol. 5. No 4. Pp. 517 – 526.

16. Hatje V., R.M.A. Pedreira, de Rezende C.E., Augusto C., Schettini F., de Souza G.C., Marin D.C., Hackspacher P.C. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. *Scientific reports*. 2017, Vol. 7. Article 10706. DOI: 10.1038/s41598-017-11143-x.

17. Liu R., Liu J., Zhang Z., Borthwick A., Zhang K. Accidental water pollution risk analysis of mine tailings ponds in Guanting Reservoir Watershed, Zhangjiakou City, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015. Vol. 12. No 12. Pp. 15269 – 15284. DOI: 10.3390/ijerph121214983.

18. Phillips J. Applying a mathematical model of sustainability to the Rapid Impact Assessment Matrix evaluation of the coal mining tailings dumps in the Jiului Valley, Romania. *Resources, Conservation and Recycling*. 2012. Vol. 63. Pp. 17 – 25. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.03.003.

19. Trubetskoy K.N. Solving the problems of environmentally balanced development of deposits by open geotechnologies. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no 6, pp. 71 – 76. [In Russ].

20. Kachurin N.M., Stas' G.V., Kalayeva S.Z.K., Korchagina T.V. Geocological assessment of the effectiveness of environmental protection and environmental protection measures in underground coal mining. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2016, no 3, pp. 63 – 81. [In Russ].

21. Krupskaya L.T., Zvereva V.P., Panfilov O.O. Estimation of environment pollution in zone of tailing dump influence in the south Far East of Russia and necessity of monitoring organization. *WIT Transactions on Engineering Sciences*. 2014. Vol. 88. Pp. 499 – 504.

22. Gula K.E., Korneeva N.I., Krupskaya L.T., Zvereva V.P., Golubev D.A., Pavlichenko A.V. Mathematical models of additional purification of sewage (in a form of pulp) on heavy metals using hydrophytes. *Russian Journal of General Chemistry*. 2015. Vol. 85. No 13. Pp. 2942 – 2944.

23. Khanam A. Phytoremediation. A green bio-engineering technology for cleanup the environmental contaminants. *International Journal of Recent Scientific Research*. 2016. Vol. 7. Pp. 9925 – 9928. DOI: 10.1134/S1070363215130113.

24. Emamverdian A., Ding Y., Mokhberdorani F., Xie Y. Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response. *The Scientific World Journal*. 2015. Article ID 756120. 18 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/756120>.

25. Wolejko E., Wydro U., Loboda T. The ways to increase efficiency of soil bioremediation. *Ecological Chemistry and Engineering*. 2016. Vol. 23. Pp. 155. DOI: 10.1515/eces-2016-0011.

26. Sharov P.O. *Zagryaznenie svintsom pos. Rudnaya Pristan' i ego vliyanie na zdorov'e detey* [Lead pollution Ore Quay and its impact on children's health]. Vladivostok, Dal'nauka, 2005, 132 p.

27. Gifford F. Use of Routine meteorological observations for estimating atmospheric dispersion. *Nuclear Safety*. 1961. Vol. 2. No 4. Pp. 47 – 51.

28. Majorova L.P., Krupskaya L.T., Cherentsova A.A., Filatova M. Yu. Assessment of the environmental situation within the limits of the influence of tailings dumps in the Dalnegorsky district of Primorsky Krai. *Ekologicheskaya khimiya*. 2018. Vol. 27, no 6, pp. 317 – 327. [In Russ].

29. Kumpiene J., Desogus P., Schulenburg S., Arenella M., Renella G., Brdnnvall E., Lagerkvist A., Andreas L., Sjöblom R. Utilisation of chemically stabilized arsenic-contaminated soil in a land fill cover. *Environmental Science and Pollution Research*. 2013. Vol. 20. No 12. Pp. 8649 – 8662. DOI: 10.1007/s11356-013-1818-3.

30. Shrivastava A., Ghosh D., Dash A., Bose S. Arsenic Contamination in Soil and Sediment in India: Sources, Effects, and Remediation. *Current Pollution Reports*. 2015. Vol. 1. No 1. Pp. 35 – 46. DOI: 10.1007/s40726-015-0004-2.

31. Rastanina N.K., Krupskaya L.T., Golubev D.A., Cherentsova A.A. Evaluation of health risk due to pollution with waste of the abandoned Khrustalnensky Mining and Processing Plant. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no 12, pp. 88 – 95. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-88-95.

32. Ivanov G.I. *Osobennosti pochvoobrazovaniya na yuge Dal'nego Vostoka* [Features of soil formation in the south of the Far East], Novosibirsk, 1973, 45 p.

33. Kachor O. L. *Razrabotka nauchno-prakticheskikh osnov likvidatsii nakoplennoego ekologicheskogo ushcherba ot mysh'yakovistykh otkhodov gorno-pererabatyvayushchey promyshlennosti* [Development of scientific and practical principles for the elimination of accumulated environmental damage from arsenic waste from the mining industry], Doctor's thesis, Irkutsk: IRNITU, 2019, 407 p.

34. Kachor O. L. Development of a model for the migration of arsenic along the soil profile from accumulated waste from the mining industry. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiyskoy akademii yestestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh*. 2019, vol. 42, no 2, pp. 144–150. [In Russ].

35. Ilin V. B., Syso A. I., Baidina N. L., Konarbaeva G. A., Cherevko A. S. Background concentrations of heavy metals in soils of southern western Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2003. Vol. 36. No 5. Pp. 494–500.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Колобанов Константин Александрович^{1,2} — аспирант, младший научный сотрудник, e-mail: kolobanov.92@mail.ru,

Филатова Мария Юрьевна^{1,2} — ведущий инженер, младший научный сотрудник,

Бубнова Марина Борисовна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник,

Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН,

Ромашкина Екатерина Анатольевна¹ — канд. биол. наук, доцент,

¹ Тихоокеанский государственный университет,

² Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства.

Для контактов: Колобанов К.А., e-mail: kolobanov.92@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

K.A. Kolobanov^{1,2}, Graduate Student, Junior Researcher, e-mail: kolobanov.92@mail.ru,

M.Yu. Filatova^{1,2}, Leading Engineer, Junior Researcher,

M.B. Bubnova, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,

Mining Institute, Far Eastern Branch

of Russian Academy of Sciences, 680000, Khabarovsk, Russia,

E.A. Romashkina¹, Cand. Sci. (Biol.), Assistant Professor,

¹ Pacific National University, 680035, Khabarovsk, Russia,

² Far East Forestry Research Institute,

680020, Khabarovsk, Russia.

Corresponding author: K.A. Kolobanov,

e-mail: kolobanov.92@mail.ru.

Получена редакцией 30.01.2020; получена после рецензии 23.10.2020; принята к печати 10.03.2021.

Received by the editors 30.01.2020; received after the review 23.10.2020; accepted for printing 10.03.2021.

