

Комплексный подход к геоэкологической оценке объектов накопленного вреда

© 2022. О. Л. Качор¹, д. т. н., руководитель департамента,
А. В. Паршин^{1,2}, к. г.-м. н., научный руководитель института,
В. В. Трусова^{1,2}, к. т. н., с. н. с.,

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83,

²Институт геохимии им. Виноградова СО РАН,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Фаворского, д. 1А,

e-mail: olgakachor@geo.istu.edu, sarhin@geo.istu.edu, vvtrusova@geo.istu.edu

В статье рассматривается пример решения проблемы детальной и быстрой геоэкологической оценки техногенно нарушенной территории за счёт применения комплекса экспрессных геохимических, аэро- и наземных геофизических, экотоксикологических и геоинформационных методов, а также малоглубинного бурения портативными установками. Модельным объектом выступает промплощадка бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» в г. Свирске Иркутской области, прекратившего свою деятельность более 20 лет назад. В ходе исследований выявлены значительные превышения валовых содержаний по свинцу – до нескольких тысяч раз, и в сотни раз – по мышьяку, меди, цинку и никелю. Построены карты ореолов рассеяния, с помощью малоглубинного бурения установлены глубина проникновения токсикантов вглубь почвенного профиля и факт накопления загрязняющих веществ на природном геохимическом барьере – мощном глиняном затворе на глубине 1,5 м. Методами наземной и с помощью беспилотных летательных аппаратов гамма-съёмки установлена повышенная радиоактивность строительных материалов, использованных для постройки некоторых зданий в пределах и за пределами промплощадки, в том числе – относящихся в настоящее время к хозяйственно-бытовому и культурным. Методами биотестирования впервые обнаружены участки территории с отходами II и III классов опасности, при этом установлено, что наибольшую экологическую опасность представляют поллютанты не с максимальным коэффициентом контрастности аномалий. Данные воздушной лидарной съёмки и фотограмметрии позволили оценить объёмы отходов, находящихся на поверхности. В результате проведённых исследований выявлен опасный объект накопленного вреда окружающей среде, требующий принятия незамедлительных решений по его ликвидации.

Ключевые слова: геоэкологическая оценка, накопленный вред, тяжёлые металлы, почва, загрязнение, беспилотные летательные аппараты, геохимия окружающей среды, Прибайкалье.

An integrated approach to the geoecological assessment of accumulated damage objects

© 2022. O. L. Kachor¹ ORCID: 0000-0003-1889-9934[†]
A. V. Parshin^{1,2} ORCID: 0000-0003-3733-2140[†]
V. V. Trusova^{1,2} ORCID: 0000-0002-8168-9537[†]

¹Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontova St., Irkutsk, Russia, 664074,

²Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
1A, Favorskogo St., Irkutsk, Russia, 664033,

e-mail: olgakachor@geo.istu.edu, sarhin@geo.istu.edu, vvtrusova@geo.istu.edu

The article considers an example of solving the problem of a detailed and rapid geoecological assessment of a technogenically disturbed site through the use of a set of recent achievements in the field of geochemical, airborne and ground geophysical, ecotoxicological, and geoinformation methods, as well as near-surface drilling. The object is the industrial site of the former “Vostsibelement” battery plant in Svirsk (Eastern Siberia, Russia), which was closed more than 20 years ago. The object is localized within the Baikal natural territory – a UNESCO World Heritage Site. Significant excesses of the total content of lead were revealed by express XRF analysis – up to several thousand times, and hundreds of times for arsenic, copper, zinc and nickel. Concentration maps were constructed. Using the drilling, the depth of penetration of toxicants into the depth of the soil profile has been found. Terrestrial and UAV gamma survey methods have established

increased radioactivity of building materials of some buildings within and outside the industrial site. For the first time, biotesting methods revealed areas of the territory with waste of II and III hazard classes. As a result of ecotoxicological experiments, it was found that, despite the fact that lead anomalies have the maximum contrast, arsenic poses the greatest environmental hazard. Aerial lidar and photogrammetry data have made it possible to estimate the amount of waste located on the surface. Drilling data allow us to estimate the amount of contamination in the near surface part of the section. It is shown that a dangerous object of accumulated harm to the environment was identified, it needs to be immediately liquidated. One of the main conclusions is the substantiation of the need to conduct significantly more detailed geocological studies, in comparison with the accepted state standards of Russia, otherwise the results of the geocological assessment of such complex objects will be unreliable.

Keywords: geocological assessment, accumulated harm, heavy metals, soil, pollution, unmanned aerial vehicle technology, environmental geochemistry, Baikal Region.

Озеро Байкал и Байкальская природная территория со своей уникальной экосистемой являются объектом всемирного природного наследия ЮНЕСКО. При этом в пределах Байкальской природной территории расположены крупные города Иркутской области (Иркутск, Ангарск, Усолье-Сибирское, Свирск и другие) с высоким уровнем хозяйственной деятельности, в том числе химическими, металлургическими, машиностроительными и другими производствами, оказывающими значительное влияние на окружающую среду (ОС). Предприятия являются как действующими, так и заброшенными, на последних зачастую находится большое количество неликвидированных отходов. Такие территории по законодательству должны быть внесены в Государственный реестр объектов накопленного вреда окружающей среде (ГРОНВОС) для ожидания своей очереди на государственное финансирование с целью их дальнейшей ликвидации. Приоритезация данного процесса должна зависеть от реальной экологической опасности каждого объекта, для чего все известные и предполагаемые объекты необходимо тщательно исследовать. В случае некорректной оценки потенциального негативного влияния объекты могут годами оставаться в очереди на ликвидацию, продолжая наносить непоправимый вред ОС и населению. Поскольку ресурсы на проведение геоэкологических исследований ограничены, возникает проблема повышения оперативности и снижения затрат на получение достоверных сведений о потенциально опасных объектах.

Цель исследований: предложить и опробовать универсальный комплекс современных геофизических, геоинформационных, геохимических и аналитических методов для решения сложных геоэкологических задач.

Объекты и методы исследования

Авторы предлагают экспрессный подход к геоэкологическим исследованиям, осно-

ванный на последних достижениях в области методов сбора геоданных, и иллюстрируют его эффективность на примере геоэкологического изучения промплощадки бывшего завода по производству аккумуляторов – ОАО «Востсибэлемент» (ВСЭ) в г. Свирске Иркутской области. С запросом по оценке её экологического состояния в Иркутский национальный исследовательский технический университет обратилась местная администрация. Завод был основан в 1939 г. и просуществовал до 1999 г. После чего на небольшом участке основной территории закрытого завода на базе бывшего цеха серебряно-цинковых батарей создана компания «Аккумуляторные технологии» («АкТех»), которая по настоящее время занимается выпуском химических источников тока. Также часть площадей бывшей промплощадки занимают действующие малые предприятия, чья деятельность не связана с основной повесткой ВСЭ. Остальная территория бывшего завода оказалась не востребованной, но и не была своевременно рекультивирована (рис. 1).

Поэтому на протяжении последних 23 лет оставшиеся на ней полуразрушенные цеха, отходы производства и загрязнённый грунт являются постоянными источниками ухудшения



Рис. 1. Участок промплощадки ВСЭ: пример с сыпучими отходами на поверхности
 Fig. 1. Section of the industrial site Vostsibele-
 ment: an example with loose waste on the surface



Рис. 2. Пункты пробоотбора по намеченным пробным площадкам:  – границы промплощадки завода, ● – пункты пробоотбора
 Fig. 2. Sampling points for the planned test sites:  – factory site boundaries, ● – sampling points

качества объектов ОС прилегающей территории. Опасность заброшенной промплощадки априори представлялась нам крайне серьезной из-за высокой токсичности потенциальных загрязняющих веществ (ЗВ), а также неудачного местоположения изучаемого объекта: ВСЭ расположен в границах г. Свирска, менее чем в 700 м от территории детского сада, менее 400 м от садоводческих участков, и менее 5 м до уреза воды главной транспортной артерии Иркутской области – реки Ангары (объект высшей категории).

Исследования по геоэкологической оценке объекта накопленного вреда проводились в течение двух недель, включая пробоотбор и камеральные работы силами трёх преподавателей и 10 студентов.

Геохимические исследования. Одним из основных методов, используемых при геоэкологической оценке территории, является отбор образцов почвы и грунта [1]. Традиционно такой вид исследований проводится в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017. Для определения содержания в почве химических элементов нормативный документ предполагает взятие с пробной площадки размером от 1 до 5 га одной объединённой

пробы, которая в свою очередь представляет собой смесь не менее двух точечных проб общей массой не менее 1 кг.

Такая плотность сетей опробования в связи с высокой сложностью инженерной ситуации на участке представлялась нам недостаточной. В связи с высоким риском пропуска в данных условиях значимых аномалий, было принято решение о сгущении сети пробных площадок в 5 раз, т. е. размер каждой пробной площадки составил 0,2 га (рис. 2). С целью изучения накопления ЗВ в поверхностном слое почвы пробы были отобраны с двух уровней: от 0 до 5 см и от 5 до 20 см. Пробы отбирали пластиковыми шпателями, чтобы исключить дополнительное загрязнение грунта.

Всего с промплощадки было отобрано: 350 проб техногенного грунта, 10 проб сыпучих отходов неустановленного происхождения, 5 проб строительных конструкций (кирпич). Для установления вероятного негативного влияния источников загрязнения за пределами промплощадки завода отобрано 26 проб грунта траверсами по направлению розы ветров с заходом в жилой сектор. Также были отобраны 4 пробы почвы для определения локального геохимического фона, которые были взяты на значительном удалении от промплощадки, но в той же геолого-геохимической ситуации. Для получения данных о региональных фоновых концентрациях химических веществ в почвах, фоновые пробы почв были отобраны вне сферы локального антропогенного воздействия. Отбор фоновых проб проводили на достаточном удалении от города и пригородной застройки (с наветренной стороны), не менее чем в 500 м от автодорог. Пробоподготовку проводили в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017.

Для повышения оперативности исследования и снижения его стоимости подготовленные пробы анализировали с помощью портативного рентгенофлуоресцентного анализатора (РФА) SciAps серии X в режиме «Почва». Для оценки адекватности получаемых портативным РФА результатов, некоторые пробы были дополнительно проанализированы в аккредитованной лаборатории (Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, RA.RU.21ГП12) с использованием сканирующего рентгенофлуоресцентного спектрометра марки S4 Pioneer Bruker. Применение экспрессного геохимического анализа было необходимо для оперативного выделения основных аномалий и их изучения другими методами.

Бурение. Для установления глубины проникновения ЗВ было произведено колон-

ковое бурение основных аномалий с помощью специальной мобильной буровой установки на базе мощного бензоперфоратора. Были выбраны 6 пунктов, бурение на которых провели с отбором керна через каждые 0,5 м, разрез исследовали на глубину до 1,5 м (на которой был встречен водоупор).

БПЛА-геодезия. Параллельно с геохимической съёмкой было проведено маловысотное дистанционное зондирование Земли с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) методами гамма-радиометрии, воздушных лидарных сканирований и мультиспектральной фотограмметрии. В качестве носителя использовали стандартный гексакоптер из состава беспилотного комплекса SibGIS UAS [2]. Аэрофотосъёмку (АФС) вели в режиме кинематики реального времени (RTK) с точностью привязки фотоснимков на уровне первых сантиметров и пространственным разрешением 5 см/пиксель.

Воздушные лидарные сканирования выполняли сканером на базе сенсора Velodyne VLP16, обеспечивающим точность XYZ на уровне $4 \times 4 \times 4$ см.

Фотограмметрические и лидарные съёмки проводили для выявления участков с ЗВ на поверхности, создания их трёхмерных моделей и оценки объёмов. Представлялось важным минимизировать контакт людей с потенциально токсичными веществами. С помощью лидарной съёмки были получены высокоточные модели вертикальных стен зданий и областей под деревьями, что труднодостижимо с помощью фотограмметрии.

Радиометрия. Гамма-радиометрию проводили в БПЛА и наземном вариантах. Детектором выступал специально изготовленный радиометр на основе двух кристаллов CsI(Tl) $8 \times 8 \times 100$ мм с кремниевым фотоэлектронным умножителем. Метрологически он аналогичен используемым для наземной заверки радиометрам СРП-68 [3]. Съёмку проводили на высоте 50 м с шагом между профилями в 25 м. Частота измерений составляла 0,5 Гц, скорость полёта – 5 м/с. Схема гамма-поля всей промплощадки и окружающего пространства была необходима для проведения выборочных наземных исследований основных аномалий, поскольку чисто пешеходные радиометрические исследования сложнопроходимого и опасного участка заняли бы значительное время. Участки с выявленным по данным БПЛА-съёмки повышенным уровнем гамма-фона были обследованы с помощью поверенного в установленном порядке радиометра СРП-68.

Геостатистическая обработка. Данные химического анализа и геофизических измерений были внесены в базы данных в ГИС-проекте. Для построения карт распределения концентраций химических элементов в двух слоях почвы и карты радиационного фона нами была произведена интерполяция методом **Universal Kriging**. Результаты интерполяции были перенесены в ГИС-проект QGIS для оформления карт.

Базовую обработку данных лидарной съёмки проводили с помощью программного обеспечения **Topodrone Lidar**. **Фотограмметрическую** обработку аэрофотоснимков производили в открытом программном обеспечении OpenDroneMap и далее обрабатывали в среде QGIS. С помощью стандартных средств этой ГИС был выполнен синтез данных мультиспектральной съёмки в видимые цвета и псевдоцвета, расчёт объёмов осуществляли с помощью модуля Volume Calculation.

Экотоксикологические исследования. Для установления класса опасности техногенного грунта и отходов промплощадки по отношению к объектам ОС были проведены токсикологические исследования в аккредитованной испытательной лаборатории «Альфалаб» (RA.RU.21AE20). С целью получения максимально достоверных результатов, а также ввиду сложности и неизученности объекта и его токсических проявлений испытания проводили по нескольким аттестованным методикам, предусматривающим использование различных тест-организмов. Так, использовали культуру люминесцентных генно-инженерных бактерий *Escherichia coli*. Данная методика основана на определении изменения интенсивности биолюминесценции бактерий при воздействии химических веществ, присутствующих в анализируемой пробе, по сравнению с контролем. Также в роли тест-объекта выступали культуры зелёной водоросли *Chlorella vulgaris* Beijer. В основе метода лежит регистрация различий в величине оптической плотности тест-культуры хлореллы, выращенной на среде, не содержащей токсических веществ (контроль) и в тестируемых пробах вод и водных вытяжек (опыт), в которых эти вещества могут присутствовать. Ещё одним используемым тест-организмом была *Daphnia magna* Straus. Сутью метода является определение смертности дафний при воздействии токсических веществ, присутствующих в исследуемой пробе, по сравнению с контрольной культурой в среде, не содержащей токсических веществ.

Результаты и обсуждение

В результате проведённой геохимической съёмки и последующих химико-аналитических исследований в техногенном грунте промплощадки ВСЭ выявлены значительные превышения нормативных и фоновых значений по тяжёлым металлам: по свинцу (ПДК = 32 мг/кг) в отдельных пробах достигающие нескольких тысяч раз, по мышьяку (ПДК = 2 мг/кг), цинку, меди, никелю – в сотни раз (рис. 3, см. цв. вкладку II). При этом свинец, мышьяк и цинк относятся к первому классу опасности химических элементов в грунтах, медь и никель – ко второму классу. Также на основании полученных данных был произведён расчёт степени загрязнения почвы на каждом гектаре промплощадки, в результате чего установлено, что техногенный грунт на площади 17 га промплощадки относится к категории «чрезвычайно опасная», на 13 га – к «опасная», на 2 га – к «умеренно опасная» степень химического загрязнения.

На основании полученных результатов химического анализа проб техногенного грунта были созданы электронные карты распределения ЗВ на территории бывшего завода и по ним выявлены зоны значительных техногенных аномалий (рис. 3). Свинец и мышьяк являются приоритетными загрязнителями промплощадки ВСЭ, т. е. их валовое содержание в наибольшей степени превышает фоновые и нормативные значения, принятые для этих элементов, поэтому рассмотрим электронные карты, построенные для них.

Как видно из рисунка 3, ореолы распространения приоритетных загрязнителей не совпадают. Свинец локализован вокруг основных бывших цехов производства: на северо-западе – это ангары, в южной половине промплощадки расположены цеха по изготовлению стартерных свинцово-кислотных аккумуляторов, цех изготовления гальванических элементов марганцево-цинковой системы товаров народного потребления, литейный, намазочный, мельничный, формовочный и сборочный участки, а также склад готовой продукции (рис. 4, см. цв. вкладку II). Аномалии мышьяка в основном приурочены к обжигово-угольному участку, котельным, складам, очистным сооружениям, а также к угольно-прессовому цеху, т. е. крайне высокое загрязнение территории промплощадки мышьяком скорее всего связано с его присутствием в используемом твёрдом топливе.

Перед началом полевых работ на промплощадке на основании архивных данных по расположению основных цехов завода по территории промплощадки были выдвинуты гипотезы о возможных местах наибольшей локализации ЗВ. Однако, оказалось, что не все установленные по электронным картам зоны распределения техногенных аномалий находятся в ожидаемых участках промплощадки в границах наиболее опасных производственных цехов. Вероятны ситуации с перемещением отходов в границах промплощадки для высвобождения территорий под существующие на данный момент хозяйственные объекты. При этом независимо от причин смещения зон наибольших техногенных аномалий, этот факт лишь подтверждает необходимость крайне детального исследования сложных нарушенных территорий вопреки рекомендациям нормативных документов.

За время работы завода и после его закрытия без рекультивации происходило постоянное поступление и закрепление токсикантов в депонирующих средах. Для оценки объёмов загрязнения необходимо было оценить глубину проникновения ЗВ в почву. Для подтверждения значительной вертикальной миграции токсикантов были отобраны пробы с различной глубины. На основании электронных карт распределения ЗВ в зонах максимальных техногенных аномалий загрязнителя, который мы на тот момент считали приоритетным (свинец), были намечены участки и проведено уточняющее бурение на глубину до 1,5 м. Пробы отбирали с глубин 0,5, 1 и 1,5 м. В результате проведённых исследований было установлено, что токсиканты мигрируют по почвенному профилю и концентрируются на природном геохимическом барьере – глинистых отложениях. Ранее проводимые в городе исследования [4, 5] показали, что для Свирска характерно залегание ниже почвенного слоя мощного слоя суглинков (от 2 до 7 м). По результатам визуального описания проб грунта с глубины 0,5 и 1 м на этих горизонтах преобладает супесь, не обладающая высокой сорбционной ёмкостью. Так, в одной из скважин, расположенной в 5 м от реки Ангары, установлено содержание свинца на глубине 1,5 м в количестве 1458 мг/кг, что лишь немногим меньше его концентрации на поверхности (1550 мг/кг), а содержание мышьяка на глубине даже превышает его содержание в пробе при глубине отбора 0–5 см (рис. 5).

В результате проведённого биотестирования были установлены классы опасности проб

О. Л. Качор, А. В. Паршин, В. В. Трусова
 «Комплексный подход к геоэкологической оценке
 объектов накопленного вреда». С. 65

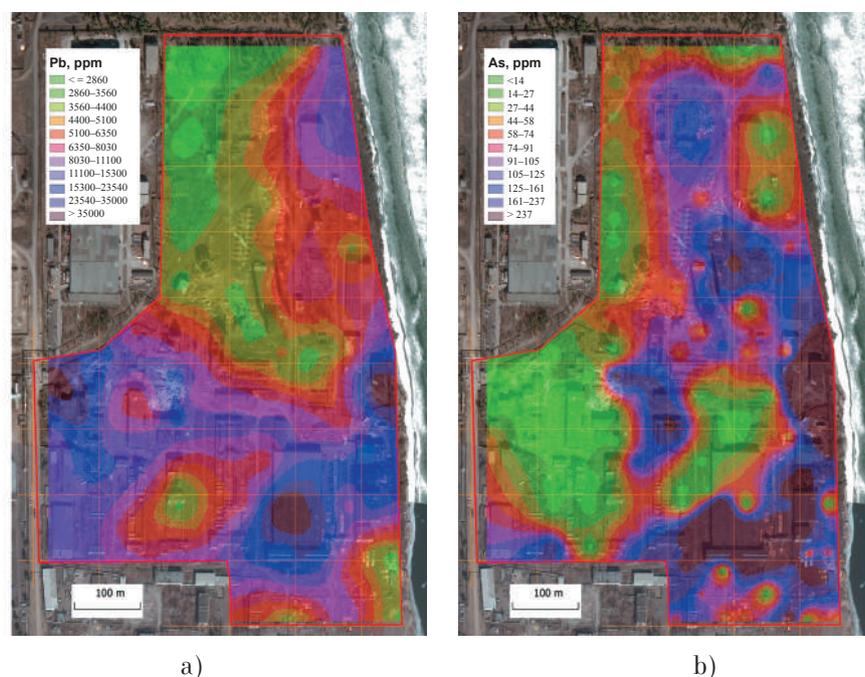


Рис. 3. Распределение в поверхностном слое грунта: а) свинца, б) мышьяка
 Fig. 3. Distribution in the surface layer of the soil: a) lead, b) arsenic

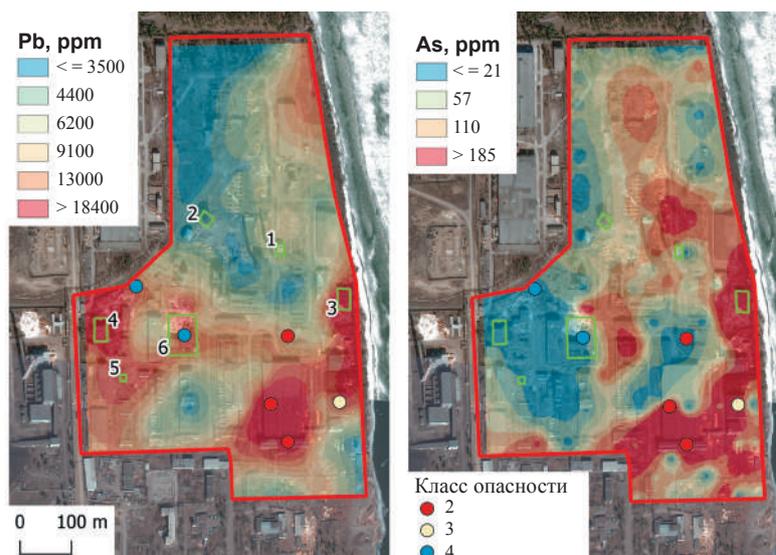


Рис. 4. Карта распределения содержания свинца (слева) и мышьяка (справа) в верхнем слое грунта на промплощадке ВСЭ, класс опасности грунта, места расположения ещё неразрушенных бывших строений завода (□): 1 – склад ядохимикатов, 2 – склад, 3 – восстановительная печь, 4 – литейный цех, 5 – смоловарка, 6 – цех по переработке свинца
 Fig. 4. Map of the distribution of lead (left) and arsenic (right) content in the upper layer of the soil at the industrial site Vostsibelement, the hazard class of the soil, locations of still undestroyed former buildings of the plant (□): 1 – toxic chemicals warehouse, 2 – warehouse, 3 – recovery furnace, 4 – foundry, 5 – resin pulping, 6 – lead processing workshop

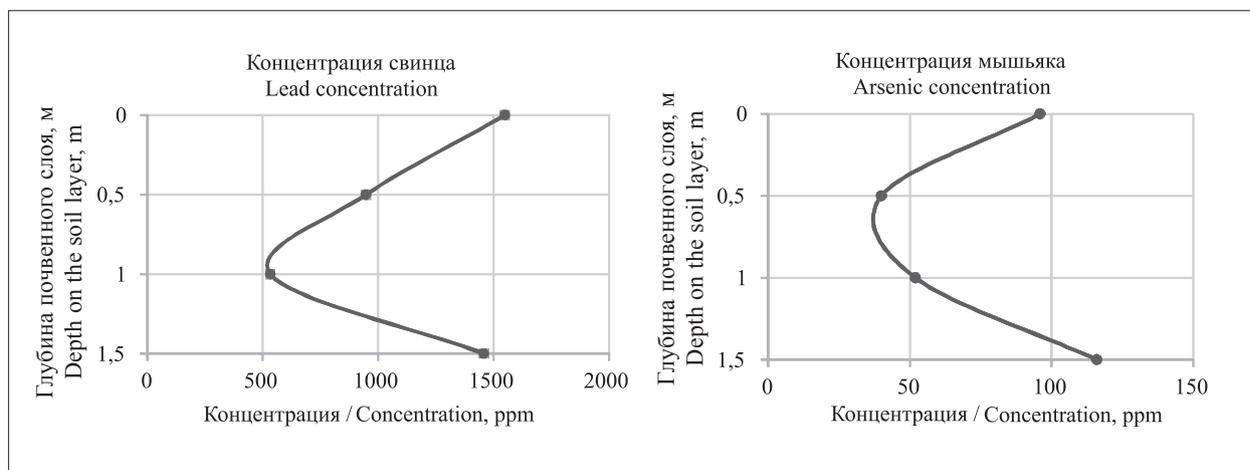


Рис. 5. Распределение концентраций свинца (слева) и мышьяка (справа) в скважинах
 Fig. 5. Distribution of lead (left) and arsenic (right) concentrations in wells

техногенного грунта с различных участков промплощадки. Из них максимальный класс опасности (II) выявлен для трёх проб с разных пробных площадок завода. Ещё несколько проб относятся к III классу опасности, эти пробы также рассредоточены по территории. Совместив карты ореолов распределения ЗВ с локациями с установленными классами опасности грунта (рис. 4, см. цв. вкладку), мы пришли к выводу, что первоначальные предположения о свинце, как о наиболее опасном поллютанте данной территории, в виду его наибольшего коэффициента контрастности, ошибочны.

Из рисунка 4 видно, что пробные площадки, с которых были отобраны пробы с установленным как наибольшим (II), так и наименьшим (IV) классами опасности, в большей степени коррелируют с ореолами распространения мышьяка, а не свинца. Очевидно, что мышьяк всё ещё находится в подвижной форме, а, следовательно, продолжает наносить наибольший токсический урон природным объектам [6]. Важно отметить, что в достаточно большом количестве научных работ, посвящённых проблеме промплощадки ВСЭ [7–10], основной акцент был достаточно ожидаемым образом смещён на свинец, но при этом количество проб, отобранных на промплощадке, не превышало первых десятков, что очевидно недостаточно для корректной геоэкологической оценки подобных объектов.

Интересны результаты радиометрических исследований. Так, по данным БПЛА-гамма-съёмки, на высоте 50 м зафиксированы аномалии гамма-поля территории на уровне порядка 25 мкР/ч, что позволяло предположить не менее 50 мкР/ч на поверхности земли – при условии, что источником аномалий гамма-

радиоактивности являлось бы радиоактивное загрязнение почвы. Однако в результате последующей наземной проверки основных аномалий оказалось, что источником повышенной радиоактивности являются материалы стен некоторых зданий – они характеризуются значениями до 30–32 мкР/ч. Причём такие здания находятся не только в пределах промплощадки, но и за её пределами, и на данный момент относятся к хозяйственно-бытовым и культурным. Безусловно, такой уровень гамма-фона не является экстремально опасным, но всё же превышает установленный наиболее безопасный уровень внешнего облучения, и постоянное проживание или даже постоянная работа в таких помещениях по действующим нормативам недопустима.

По результатам БПЛА-фотограмметрии и воздушных лидарных сканирований были оценены объёмы расположенных на поверхности отходов, таких как приведённые на рисунке 1.

Заключение

В результате использования комплекса геохимических, геофизических, геоинформационных, токсикологических и БПЛА методов был обоснован район с локальной экологической катастрофой в пределах Байкальской природной территории. Выявленный и картированный объект содержит значительный объём отходов II и III классов опасности. В ходе работ были зонированы территории с рассчитанными категориями загрязнения грунта. Детальное обследование территории позволило не упустить высокоопасные локальные аномалии по основным ЗВ, установленные на участках, не приуроченных к потенциально опасным цехам,

где можно было бы предположить их наличие. Установлен приоритетный токсикант территории – мышьяк, в основном формирующий II класс опасности техногенных отходов, что является весьма неожиданным результатом, поскольку предыдущие работы в основном фокусировались на свинце – элементе с максимальными коэффициентами контрастности аномалий, и более соответствующему производственному процессу. Показано, что именно на мышьяк необходимо делать акцент по обезвреживанию при разработке проекта ликвидации техногенного объекта.

Лидарные сканирования и малоглубинное бурение позволили установить объёмы надземных (разрушенные здания, техногенный грунт, производственные отходы) и подземных отходов соответственно, подлежащих ликвидации.

Таким образом, применённый комплексный подход позволил получить полную картину геоэкологического состояния исследуемой территории, что дало возможность обосновать необходимость включения объекта в реестр объектов накопленного вреда и приступить к планированию проекта по его ликвидации. Применение экспрессных методов химического анализа позволило корректно выделить участки с основными аномалиями, оперативно произвести их изучение методами бурения и биотестирования. Это существенно ускорило, а также и удешевило проект: заказ химико-аналитических услуг в объёме сотен проб недоступен в рамках инициативных исследований, равно как и в рамках изысканий, проводимых по стандартной методике. При этом представляется, что данное исследование наглядно демонстрирует необходимость более детального по сравнению со стандартным способом изучения сложных объектов. Показано, что информация, которую мы можем получить о них при работе при стандартном подходе, была бы весьма неполной, и неверно характеризовала проблему объекта.

К дальнейшим оптимизациям методики геоэкологических исследований относится применение методов электромагнитных зондирований в дополнение к малоглубинному бурению – для оценки объёмов отходов, концентрирующихся на контрастном по параметру электросопротивления глинистом барьере.

Учитывая, что на исследованной площадке продолжают функционировать малые предприятия, результаты данной работы имеют принципиальное значение.

Авторы благодарят за содействие сотрудников администрации МО «Город Свирск» Т.В. Балсахаеву и Д.И. Махонькина. Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки № 075-15-2020-787.

References

1. Trifonova T.A., Podolets A.A., Selivanov O.G., Martsev A.A. Assessment of soil contamination in the recreational areas of the city by the industrial compounds of heavy metals and arsenic // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 2. P. 94–101 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-2-094-101/1
2. Gantimurova S., Parshin A., Erofeev V. GIS-based landslide susceptibility mapping of the Circum-Baikal Railway in Russia using UAV data // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. No. 18. Article No. 3629. doi: 10.3390/rs13183629
3. Parshin A., Morozov V., Snegirev N., Valkova E., Shikalenko F. Advantages of gamma-radiometric and spectrometric low-altitude geophysical surveys by unmanned aerial systems with small scintillation detectors // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021. V. 11. No. 5. P. 1–25. doi: 10.3390/app11052247
4. Shen'kman B.M. Svirsky dump of arsenopyrite concentrate and its impact on water bodies // *Water Resources*. 2017. V. 44. No. 7. P. 914–923. doi: 10.1134/S0097807817070120
5. Kachor O.L., Bogdanov A.V. Research of the toxicants sorption-diffusion migration from the accumulated industrial arsenic wastes along the soil profile // *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* V. 229. Article No. 012027. doi: 10.1088/1755-1315/229/1/012027
6. Kachor O.L., Sarapulova G.I., Bogdanov A.V. Investigation of the possibility of immobilization of mobile forms of arsenic in technogenic soils // *Journal of Mining Institute*. 2019. V. 239. P. 596–602 (in Russian). doi: 10.31897/PMI.2019.5.596
7. Grebenschikova V.I., Efimova N.V., Doroshkov A.A. Chemical composition of snow and soil in Svirsk city (Irkutsk Region, Pribaykale) // *Environmental Earth Sciences*. 2017. V. 76. No. 20. Article No. 712. doi: 10.1007/s12665-017-7056-0
8. Belogolova G.A., Gordeeva O.N., Sokolova M.G., Pastukhov M.V., Poletaeva V.I., Vaishlya O.B., Belozeroва O.Y. Transformation of lead compounds in the soil-plant system under the influence of *Bacillus* and *Azotobacter* rhizobacteria // *Chemistry and Ecology*. 2020. V. 36. No. 3. P. 220–235. doi: 10.1080/02757540.2020.1723557
9. Belogolova G.A., Matyashenko G.V., Zaripov R.Kh. Biogeochemical characteristics of natural and technogenic ecosystems of the southern Baikal Region // *Russian Journal of Ecology*. 2000. V. 31. No. 4. P. 238–244. doi: 10.1007/BF02764054
10. Kuznetsova A.I., Zarubina O.V., Leonova G.A. Comparison of Zn, Pb, Ni, Cr, Sn, Mo concentrations in tissues of fish (roach and perch) from Lake Baikal and Bratsk reservoir, Russia // *Environmental Geochemistry and Health*. 2002. V. 24. No. 3. P. 205–212. doi: 10.1023/A:1016080810423