

С. В. Дуброва, И. И. Подлипский

ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПАРАГЕНЕТИЧЕСКИХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ АССОЦИАЦИЙ ПОЛЛЮТАНТОВ ПОЛИГОНОВ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, Российская Федерация

Последнее десятилетие большинство образующихся полигонов ТБО на территории Ленинградской области были несанкционированны и представляют собой потенциальный источник экологической опасности для окружающей природной среды. Создание новых геохимических барьеров, как один из этапов процесса рекультивации, также несет дополнительную антропогенную нагрузку и из-за недостаточного изучения порой приводит к новым экологическим проблемам. Так как Ленинградская область в большей части имеет схожие геологические условия, то рационально в результате мониторинга отдельных полигонов ТБО создать комплексную концепцию рекультивации. Необходим новый подход, главной целью и отличительной особенностью которого будет сохранение существующих геохимических барьеров, т. е. минимизация нарушений и дисбаланса природного самовосстановления экосистем. Оценка парагенетических геохимических ассоциаций (изучение конкордантности и дискордантности элементов) помогает создавать модели миграции и концентрации поллютантов, свойственные определенному типу полигонов ТБО, схожих по геолого-морфологическим характеристикам. Библиогр. 13 назв. Ил. 5. Табл. 1.

Ключевые слова: свалки, полигоны, твердые бытовые отходы (ТБО), экологическая геология, факторный анализ, регрессионный анализ, корреляционный анализ, парагенетические ассоциации, рекультивация.

ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF GEOLOGICAL PARAGENETIC GEOCHEMICAL ASSOCIATIONS OF POLLUTANTS OF LANDFILLS OF LENINGRAD REGION

S. V. Dubrova, I. I. Podlipskiy

St. Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

Most of landfill sites which emerged in the Leningrad Region during the last decade are illegal and harmful for the environment. Unavoidably it leads to environmental disaster. Creation of new geochemical barriers as one of the stages of the remediation process also provokes additional anthropogenic load. And due to lack of research it can lead to new environmental problems. Since geological conditions throughout the Leningrad region are similar, it is possible to create a comprehensive model of rehabilitation, based on the results of the monitoring of selected landfills. It is crucial to find a new approach, the main aim and distinctive feature of which would be preservation of existing geochemical barriers and minimization of imbalances in self-healing process of natural ecosystems. Rating of paragenetic geochemical associations (the studying of concordance and discordance of elements) helps to create a model of migration and concentration of pollutants which are typical to a certain type of landfills with similar geological and morphological characteristics. Refs 13. Figs 5. Tables 1.

Keywords: waste dumps, landfills, municipal solid waste (MSW), environmental geology, factor analysis, regression analysis, correlation analysis, paragenetic association, remediation, reclamation.

Введение. Одной из актуальных и масштабных проблем, связанных с ухудшением качества окружающей природной среды, является нерациональное, экологически опасное и не всегда организованное обращение с отходами. В последние десятилетия, в связи с увеличением разнообразия товаров народного потребления,

наблюдается усложнение состава твердых бытовых отходов (ТБО), увеличение содержания в них пластмасс и полимеров, средств бытовой химии, тяжелых металлов и редких элементов, используемых в электронной аппаратуре. Усложнение состава ТБО обуславливает увеличение количества различных поллютантов (в том числе таких супертоксиантов, как диоксины), образующихся в процессе трансформации (разложения), сжигания, переработки отходов, из-за несовершенства технологий их утилизации. Значительное количество ТБО попадает на несанкционированные полигоны, количество которых на территории Российской Федерации постоянно растет. Поэтому ТБО представляют собой значимый источник деградации окружающей природной среды. В настоящий момент времени экологическое состояние Ленинградской области находится под угрозой. Последнее десятилетие большинство образующихся полигонов ТБО на территории области были несанкционированными и, в связи с этим, представляют собой потенциальный источник экологической опасности для окружающей природной среды. Чтобы избежать экологической катастрофы, следует уделить больше внимания мониторингу и последующей рекультивации существующих мест захоронения ТБО.

Объектом и предметом работы является исследование возникших на территории свалок ТБО антропогенно-модифицированных экосистем, процессов их эволюции и потенциала самовосстановления. С практической стороны данный подход вносит неоценимый вклад в методику разработки проектов рекультивации и повышения их экономическую целесообразности путем как снижения эксплуатационных затрат на содержание полигонов (по средствам возможного уменьшения (сокращения) зоны санитарной охраны), так и уменьшения стоимости проведения работ по восстановлению состояния окружающей среды.

Создание новых геохимических барьеров, как один из этапов процесса рекультивации, также несет дополнительную антропогенную нагрузку и из-за недостаточного изучения порой приводит к новым экологическим проблемам. Необходим новый подход, главной целью и отличительной особенностью которого будет сохранение существующих геохимических барьеров, т. е. минимизация нарушений и дисбаланса природного самовосстановления экосистем. В свою очередь, свалки (полигоны) твердых бытовых отходов рассматриваются авторами как единые эколого-геологические системы. Они представляют собой антропогенно-модифицированную модель, включающую в себя геологическое тело природно-техногенного генезиса (сложенная свалочным грунтом), подстилающие горные породы и прилегающие территории (окружающая среда) [1].

Данная работа направлена на комплексную эколого-геохимическую оценку свалок ТБО Ленинградской области, обоснование методов и этапов изучения (основ эколого-геохимической концепции) процессов миграции поллютантов, протекающих в свалочном теле и на прилегающих территориях. Весь комплекс оценки будет включать в себя эколого-геологическую характеристику свалок ТБО, как современных природно-техногенных объектов, разработку методов статистической обработки эколого-геохимических данных и, обязательно, сравнение рассматриваемых свалок ТБО по различным геолого-геохимическим критериям.

Для решения поставленных задач были исследованы два полигона ТБО, расположенные в Ленинградской области («Полигон ТБО поселка Красава» Тихвинский район — участок № 1 и «Городская свалка г. Сланцы» Сланцевский район — участок

№ 2), и имеющие различную степень негативного воздействия на внешнюю среду.

Несмотря на то что оба исследуемых полигона находятся в разных частях Ленинградской области, по минимальному набору оценочных критериев (подстилающие грунты, климат, время образования и развития полигона) в рамках развития эколого-геохимической концепции их можно объединить в одну группу (таблица 1).

Описание природных условий объектов исследования

Характеристика	Участок № 1	Участок № 2
Место расположения	Тихвинский район Ленинградской области	Сланцевский район Ленинградской области
Время существования свалки	16 лет	16 лет
Площадь зоны складирования	10 га	4 га
Коренные породы	доломиты и мергели	доломиты и известняки
Гранулометрический состав подстилающих грунтов	супеси	супеси
Морфологический состав твердой компоненты свалочного грунта	значимых отличий не выявлено	
Фракционный состав свалочных масс	значимых отличий не выявлено	
Осадки	700–850 мм/год	490–570 мм/год
Средняя температура	–9 °С зимой, +18 °С летом	–6 °С зимой, +17 °С летом
pH почв районов исследования	3,8	4,2
Преобладающее направление ветра	юго-западное (январь), западное (июль)	юго-западное (январь), северо-западное (июль)

Геоморфологическое и климатическое сходство характеристик участков исследования указывает на перспективность проведения дополнительного сравнения их эколого-геохимических параметров. Такой подход будет способствовать выделению геохимических аномалий и барьеров, закономерностей распространения и миграции загрязнителей.

Материал и методы. Обе исследуемые свалки являются несанкционированными, т. е. возникли стихийно, без проведенных природоохранных мероприятий. Полигон ТБО поселка Красава находится юго-восточнее города Тихвин на 5-ом км Красавского шоссе, занимает территорию около 10 га. Второй исследуемый объект — это несанкционированная городская свалка Сланцевского района. Территориально она расположена северо-западнее поселка Каменка (в 5 км от города Сланцы), занимает территорию около 4 га.

Первый этап исследований полигона ТБО поселка Красава проводился в 2011 г. в рамках работ по мониторингу свалок и полигонов ТБО Ленинградской области филиала «Урангео» Российского Геоэкологического Центра (РГЭЦ). Было отобрано 15 проб почвогрунтов и проведен химический анализ на содержание 11 элементов и 4 органических соединений. В 2013 г. в рамках собственных исследований авторов сетка отбора проб была увеличена до 24 точек. На городской свалке Сланцевского района сетка пробоотбора включала в себя 16 точек (рис. 1). Объединенные пробы отбирались как с территории зоны складирования (из подстилающих свалочные

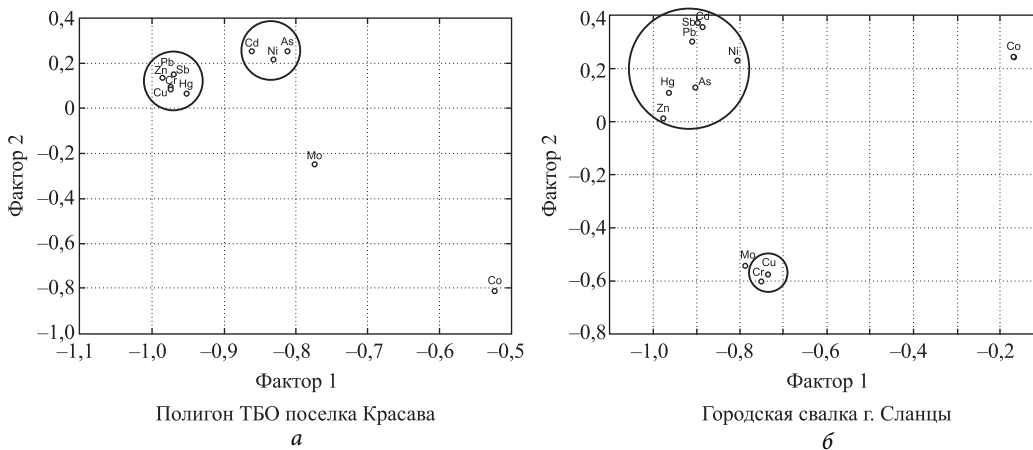


Рис. 1. Точки отбора проб тяжелых металлов и органических поллютантов (а — полигон ТБО поселка Красава, б — городская свалка г. Сланцы)

массы почвогрунтов), так и с прилегающих территорий с глубины до 2 м. Для отбора использовался ручной бензобур Stihl BT 121 с диаметром шнека 80 мм.

В 2013 г. химический анализ проб почвогрунтов участков исследования проводился на содержание тех же элементов, что и в 2011 г. (11 элементов: Hg, Pb, As, Cd, Zn, Ni, Co, Cr, Mo, Cu, Sb), атомно-абсорбционным методом на спектрометре с пламенной атомизацией AA 280FS.

Использование эколого-геохимической концепции предоставляет научную основу методике сравнения свалок и полигонов ТБО определенного региона. Её применение дает возможность проводить моделирование и прогнозирование геохимических процессов, происходящих на техногенных объектах, а именно, определение парагенетических ассоциаций элементов, описание степени их конкордантности и характеристики геохимических барьеров.

Основное назначение факторного и корреляционного анализа в настоящей работе — описание состава и степени взаимосвязи (конкордантности) элементов в геохимических ассоциациях. Гипотеза факторного анализа о существовании небольшого числа скрытых (латентных) факторов, через которые линейно выражаются все анализируемые переменные и в которых содержится вся существенная информация, соответствует понятию парагенетических ассоциаций, которые должны быть обусловлены одним общим геохимическим процессом или источником поступления элементов и веществ. При этом «...парагенетическая ассоциация — это группа сонаходящихся в конкретном природном объекте элементов, сходно (как по интенсивности, так и по знаку) реагирующих на изменение параметров среды и характеризующихся в связи с этим сопряженностью и однонаправленностью изменения их содержаний в пространстве объекта» [2]. В минералогии и геохимии парагенезис¹ — это совместное нахождение минералов или химических элементов, связанных генетически [3]. В рамках настоящей работы проводится

¹ Первоначально этим термином обозначалось совместное нахождение минералов («смежность», по определению классика русской минералогии начала XIX в. В. М. Севергина). Более детально это понятие сформулировал в 1849 г. Брейтгаупт. В. И. Вернадский предлагал под понятием парагенезиса того или иного минерала понимать все минеральные ассоциации, известные для этого минерала [4].

анализ геохимических ассоциаций имеющих один или несколько постоянных техногенных источников.

Расчеты производились с помощью пакетов программ Statistica 6.0 и Microsoft Office Excel; построение карт и картосхем — CorelDraw 12, Adobe Photoshop 8.0, Surfer 9.0 и др.

Результаты и их обсуждение. В ходе первого этапа обработки данных, с целью выявления закономерной составляющей изменчивости распределения и миграции поллютантов были применены методы описательной статистики. По результатам сопоставления природных условий и техногенных характеристик двух участков исследования (см. таблицу) была установлена высокая степень их сходства и обоснована возможность объединения геохимической информации в одну совокупность. В итоге рассматривается один массив данных, состоящий из трех выборок: участок № 1 2011 г., участок № 1 2013 г., участок № 2 2013 г. Для выявления сомнительных наблюдений по всем химическим элементам были построены диаграммы размаха «ящик с усами» (Median/Quartiles/Range). Было установлено, что длина верхнего «уса» (максимальное значение) таких элементов как Hg, Pb, As, Cd, Zn, Cr, Cu, Sb имеет значение в 2–3 раза превышающее 75% квартиль.

Было определено, что наибольшие значения содержаний этих элементов территориально соответствуют зоне складирования, поэтому гипотезу о присутствии в выборках промахов (случайных отклонений) следует отвергнуть.

Для описаний статистических характеристик содержаний использовались оценки, не связанные с тем или иным распределением: медиана, 1-й и 3-й квартили и стандартное отклонение. Оценки статистических характеристик показали, что для всех элементов характерно систематическое смещение значений медианы относительно среднего арифметического значения в сторону малых содержаний, которое может превышать стандартное отклонение. Такое отклонение значений связано с асимметрией кривой распределения (значение показателя асимметрии $A > 0$) и её растянутостью (значение показателя эксцесса $E < 0$).

Корреляционный анализ. Для установления сходства участков был проведен корреляционный анализ двух выборок (по двум участкам). Поскольку среди переменных на обеих свалках наблюдается сходство диаграмм «размаха», для оценки силы связей между ними использовались коэффициенты корреляции Спирмена, которые вычислялись для каждой из выборок. Данный коэффициент относится к непараметрическим показателям связи между переменными и определяет степень взаимодействия порядковых признаков, которые представляют собой ранги сравниваемых величин. При этом каждому значению x и y присваивается ранг в порядке возрастания их значений; и если значения повторяются, им присваивается средний между повторяющимися значениями ранг [5].

Ранговый коэффициент корреляции Спирмена не зависит от вида функции распределения величин, входящих в двумерную систему. Кроме того, количество выделенных признаков (рангов) в наших исследованиях составило меньше 20, что дает возможность говорить о высокой надежности процесса ранжирования.

Оценки парных коэффициентов корреляции свидетельствуют о том, что элементы тесно связаны друг с другом (коэффициент имеет значения больше 0,7): Hg-Zn (0,96 на участке № 1/0,96 на участке № 2), Pb-Sb (0,94/0,93), As-Cd (0,81/0,86), Cd-Ni (0,71/0,71), Cr-Cu (0,99/0,90). Сочетания переменных с максимальными значениями

коэффициентов парных корреляций по двум объектам исследования достаточно похожи, что подтверждает их возможную подобность и обоснованность дальнейшего геохимического сравнения.

Факторный анализ. Целью факторного анализа являлось сравнение свалок ТБО, находящихся в различных частях Ленинградской области, за счет редукции и классификации переменных (сокращения их числа и определения структуры взаимосвязей). Для отбора значимых факторов использовался критерий «осыпи», при котором количество факторов соответствует резкому изменению градиента собственных значений фактора в зависимости от его номера.

По факторным нагрузкам были построены диаграммы рассеяния (варимакс-вращение). Для проверки надежности выделенных ассоциаций элементов была использована такая характеристика как общность (доля дисперсии отдельных переменных, принадлежащая общим факторам и разделяемая с другими переменными). По интерпретируемым ассоциациям проводилась сравнительная характеристика исследуемых участков.

В результате факторного анализа геохимического поля территории объекта №1 было выявлено 2 значимых латентных фактора, влияющих на распределение элементов в почвогрунтах: первый фактор объяснял 48% распределения, второй — 16%, остальные меньше 10%. Среди всех химических элементов следует выделить две группы: Hg-Pb-Zn-Cr-Cu-Sb; As-Cd-Ni (рис. 2).

Факторный анализ геохимических данных объекта № 2 помог выявить два значимых латентных фактора: первый фактор объясняет 68% распределения, второй — 14%. Среди элементов выделены одна группа и одна корреляционная пара: Hg-Pb-As-Cd-Zn-Sb-Ni; Cr-Cu.

Обоснование деления генеральной совокупности на выборки. На основании внутренней неоднородности геохимического поля двух участков была выдвинута

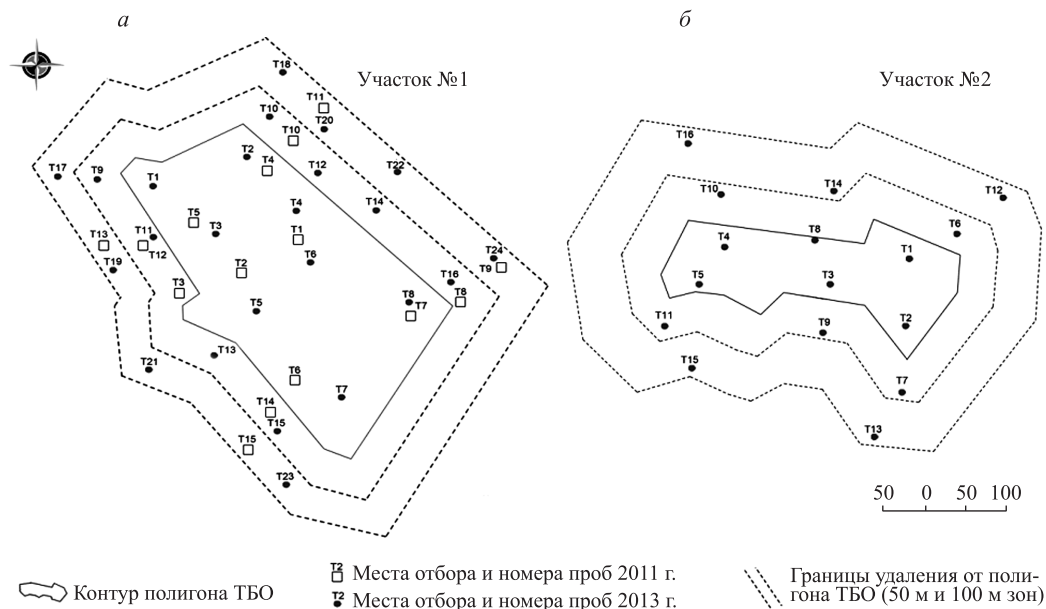


Рис. 2. Диаграммы рассеяния факторных нагрузок

гипотеза о взаимосвязях распределения тяжелых металлов в почвогрунтах не только с классами их опасности, но также и с химическими особенностями (положением в периодической системе). Деление геохимических выборок по группам химических элементов (d-элементы — Hg, Cd, Zn, Ni, Co, Cr, Mo, Cu; p-элементы — Pb, As, Sb) является необходимым для сравнительного анализа свалок (доказательства их однотипности), а также оценки степени конкордантности элементов в ассоциациях.

При рассмотрении полей корреляции также ярко выражена близкая к линейной зависимость между элементами, относящимися к одному классу опасности, поэтому рациональным будет проанализировать каждый из них в отдельности.

Вместе с множественными коэффициентами корреляции переменных друг с другом, в некоторых случаях, были подсчитаны коэффициенты детерминации, которые использовались как дополнительный фактор (мера) зависимости одной переменной от множества других.

Деление генеральной совокупности на выборки и последующий факторный анализ значительно увеличили надежность интерпретации и позволили сравнить свалки между собой. Учитывая выделенные ассоциации среди химических групп и классов опасности, состоящие из меньшего количества переменных по сравнению с анализом всего массива данных по участкам, были проанализированы факторные нагрузки, а также коэффициенты общности полных выборок. Последние помогли сократить количество элементов в группах, согласно долям дисперсии отдельных переменных, принадлежащим общим факторам и разделяемым с другими переменными. Общие ассоциации поллютантов для двух участков исследования совпадают и представлены следующими группами и корреляционными парами: Hg-Zn; Pb-Sb; As-Cd-Ni; Cr-Cu.

Для оценки степени изменения загрязнения при движении от центра к периферии геохимического поля (граница обследования) и прогноза уровня загрязнения на большие расстояния был проведен регрессионный анализ. Для всех элементов первых классов опасности были построены графики зонального распределения и линии тренда (геометрическое отображение средних значений анализируемых показателей) (рис. 3). Тип аппроксимации и группы элементов выбирались в каждом случае индивидуально, с учетом максимальных коэффициентов детерминации и схожести геохимического «поведения». В итоге по каждой из выборок вычислялись уравнения линии тренда (визуальное представление зонального распределения поллютантов) на участках исследования.

Для детального сравнения участков исследования (в рамках эколого-геохимической концепции рекультивации) и выявления скрытых факторов (потенциальных геохимических барьеров), влияющих на миграцию элементов в почвогрунтах на территории эколого-геологической системы «полигон ТБО» было проведено описание геохимического поля по каждой зональной единице в отдельности при помощи статистических методов анализа (зона складирования, 50 м, 100 м). Эти операции являются неотъемлемой индивидуальной чертой описываемой эколого-геохимической концепции рекультивации свалок ТБО (в рамках типизации объектов позволят прибегнуть к моделированию процессов миграции).

Факторный анализ способствует выделению возможных геохимических барьеров и классификации элементов относительно взаимосвязи с ними. Поэтому зональный подход исследования антропогенно-модифицированной эколого-геологической системы «полигон ТБО» требует рассмотрения двух групп характеристик

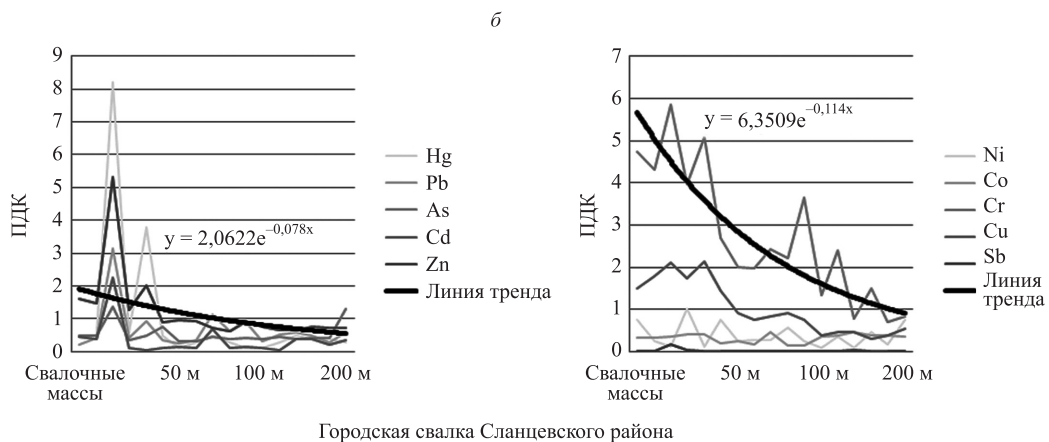
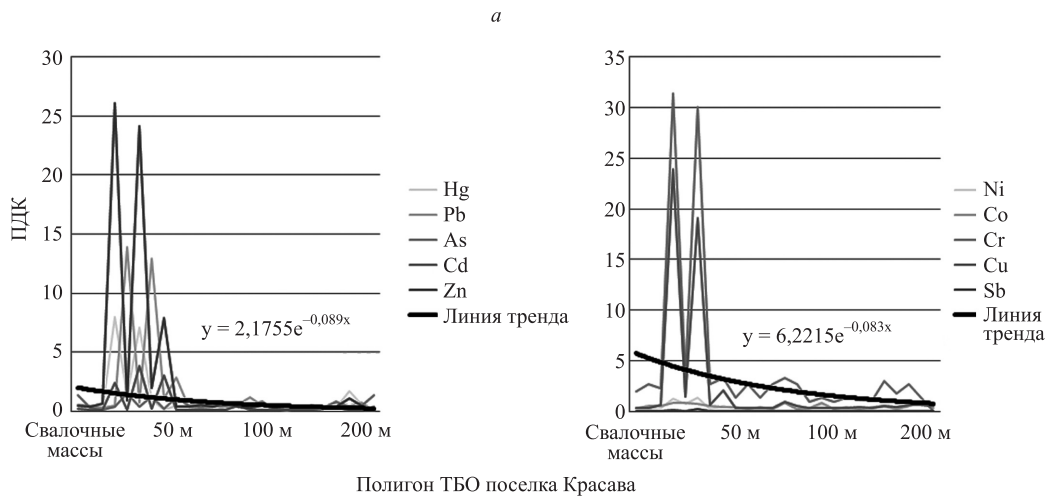


Рис. 3. Распределение тяжелых металлов 1 и 2 классов опасности по зонам: зона складирования, 50 м, 100 м

на территории участков исследования: значения концентраций и ассоциации элементов.

Каждый из участков исследования был разделен на три зоны: зона складирования свалочных масс, 50-метровая зона, 100-метровая зона. Размеры зон на участках исследования были выбраны таким образом, что окружающие свалочное тело прилегающие территории имеют площадь в 2–3 раза превышающую площадь размещенных отходов (подсчитанная площадь по границе 100-метровой зоны на участках будет в 5–10 раз больше площади по границе свалочного тела). Данный подход обеспечивает выделение разных территориальных единиц и увеличение надежности интерпретации статистических методов анализа (ввиду уравнивания количества информации по каждой из зон). Становится возможным в полной мере оценить влияние исследуемых антропогенных тел (свалок ТБО) на окружающую среду. Рациональность применения предложенного зонального деления была подтверждена исследованиями свалки поселка Красава, проведенными в 2011 г. [6].

Факторный анализ выборок подтвердил ранее полученные результаты; изменение силы связи между переменными (смещение связей As-Cd в области локализации свалочных грунтов в сторону Cd-Ni в 50-метровой зоне) может зависеть от прохождения поллютантов через различные части исследуемых участков. В каждой из зон (как свалочного тела, так и прилегающих территорий) могут находиться геохимические барьеры, на которых одни элементы будут активно накапливаться, а другие через них мигрировать. При сравнительном зональном анализе участков исследования обнаружены схожие механизмы и принципы миграции поллютантов в каждой из них.

Геохимические барьеры. Выделение и обоснование геохимических барьеров, невозможно без анализа кислотно-щелочного баланса на исследуемых территориях.

Сравнительный анализ зон двух участков при помощи статистических методов выделил значительные повышения концентраций Pb в подстилающих почвогрунтах в 50-метровой зоне. Подобные особенности поведения элементов зафиксированы для: Cd, Zn, Ni, Cr, Cu; на фоне резкого снижения pH (с 7 до 5–3 усл. ед.) Это указывает на существование на данной территории геохимического барьера, который в разной степени способствует закреплению некоторых тяжелых металлов: Pb осаждается на нем активно, в то время как Cd, Ni, Cr, Cu частично мигрируют. Таким образом, окружающие зону складирования почвогрунты выступают на путях миграции химических элементов как комплексный окислительный нейтральный барьер, границу которого можно условно провести по области распространения нейтральных значений pH (рис. 4).

В подстилающих свалочные массы грунтах складываются нейтральные и слабощелочные условия за счет процессов биогеохимического разложения органи-

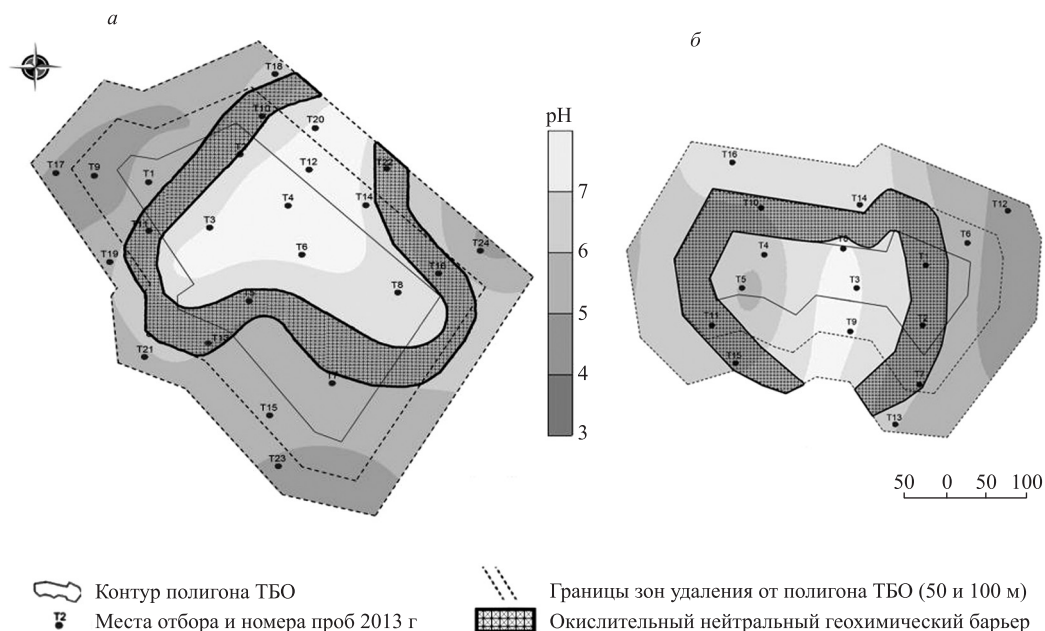


Рис. 4. Кислотно-щелочной режим почв и расположение геохимических барьеров на территории свалок ТБО, 2013 г. (а — полигон ТБО поселка Красава, б — городская свалка г. Сланцы)

минеральной массы бытовых отходов (щелочная или метановая стадия) [7]. В результате того что естественный природный уровень рН почвогрунтов Ленинградской области находится в области кислых значений, вокруг свалочных масс возникает переходная буферная зона, выступающая на пути миграции поллютантов как окислительный нейтральный (щелочной) геохимический барьер.

В 1997 г. М. А. Глазовской была выдвинута геохимическая классификация типов природных физико-химических барьеров для тяжелых металлов и металлоидов [8], которая встретила большой объем критики из-за неясного деления на «активно» и «частично» задерживающиеся элементы. В результате большинство геохимиков и по сей день придерживаются классификации Л. И. Перельмана [9], разделяющего элементы только на две группы: подвижные и неподвижные. Согласно же классификации Глазовской, Pb на комплексном окислительном нейтральном барьере (выделенном на обоих участках исследования) слабоподвижен и активно накапливается, Cd-Hg-Zn-Mo-Cu-Co-Ni-Cr — умеренно подвижны и накапливаются частично, As и Se — легкоподвижны и свободно мигрируют. Данные положения практически полностью коррелируют с результатами мониторинга свалок ТБО Ленинградской области и подтверждают выделение в отдельную группу умеренно подвижных элементов (Cd, Zn, Ni, Cr, Cu). «Частичное» осаждение элементов на барьере подтверждается смещением при зональном факторном анализе силы связей между переменными ассоциации As-Cd-Ni в сторону Cd-Ni в 50-метровой зоне, так как именно As в рассматриваемой группе является легко подвижным и свободно мигрирует через барьер. В 100-метровой зоне зафиксированы незначительные повышения концентраций ассоциации элементов Hg-As-Sb, проявление которой обосновано геохимической закономерностью о зональности литохимических аномалий, связанных с физико-химическими свойствами элементов (а именно, подвижностью) — так, наиболее мобильные элементы (в том числе ртуть и мышьяк) занимают периферийные области, а «тихоходы» эпицентры аномалии.

Выделенные в результате факторного анализа группы элементов (корреляционные пары), имеющие сходное геохимическое «поведение», возможно связаны с твердофазным (минеральным) геохимическим барьером. В почвогрунтах исследуемых участков, вероятнее всего, образуются Fe-Mn орштейны (на что указывают высокие концентрации во всех пробах Mn), которые аккумулируют элементы пар: Hg-Zn, Cd-Ni, Pb-Sb, Cr-Cu; в зоне локализации свалочных масс. На прилегающих территориях — в 100-метровой зоне — силы связей между элементами ослабевают — значение коэффициентов линейной корреляции уменьшается практически в 2 раза (уменьшение влияния барьера на распределение переменных). Для территорий исследуемых полигонов ТБО характерны два типа геохимических барьеров: твердофазные минеральные и связанный с кислотнo-щелочными условиями окислительный нейтральный.

Несмотря на то что оба исследуемых полигона находятся в разных частях Ленинградской области, по минимальному набору оценочных критериев (подстилающие грунты, климат, время образования и развития полигона) их можно объединить в одну группу. Выделенные факторным анализом корреляционные пары и ассоциации переменных на двух участках подтверждают гипотезу о подобности исследуемых объектов. Можно утверждать, что группы элементов характерны для всех полигонов данного типа с одинаковыми временно-пространственными характеристиками.

Определение парагенетических ассоциаций и корреляционных пар элементов — основа дальнейшего моделирования процессов, происходящих в природной среде в условиях техногенеза. Развитие концепции эколого-геологического мониторинга (ЭГМ) [10] с применением статистических методов анализа данных и их геохимической интерпретации позволит значительно технологически упростить процесс рекультивации свалок и полигонов ТБО и сделать его более экологически и экономически эффективным. Концентрации и особенности миграции элементов будут моделироваться согласно ранее установленным закономерностям. Достаточно будет определять содержание в пробах почвогрунтов исследуемых территорий только одного из конкордантных элементов ассоциации (корреляционной пары) рассматриваемого типа свалок бытовых отходов.

На примерах свалок, как антропогенно-модифицированных эколого-геологических комплексов, можно проследить эволюцию экосистем (от состояния практически полного отсутствия ассимиляционного потенциала — начало существования полигона до восстановления систем саморегуляции и самоочищения). Мероприятия по рекультивации необходимо подобрать таким образом, чтобы они носили вспомогательный характер (по отношению к окружающей среде и уже сформированной под воздействием деятельности человека экосистеме), а не создавали новые негативные антропогенные нагрузки. Без проведения всех этапов предложенной эколого-геохимической концепции рекультивации сделать это не представляется возможным.

Эколого-геологическая оценка. В результате проведенного факторного анализа (с учетом данных мониторинга 2011 г. полигона ТБО поселка Красава) по классам опасности и по химическим группам элементов было выделено несколько ассоциаций. Значимые превышения ПДК зафиксированы именно по элементам, вошедшим в выделенные совокупности переменных. Сила связей в корреляционных парах, в свою очередь, зависит от расположения геохимических барьеров и, следовательно, зонального строения свалок.

Вторичные геохимические ореолы рассеяния тяжелых металлов локализованы в области зоны складирования свалочных грунтов с небольшим смещением в северо-восточном направлении на свалке Тихвинского района (участок № 1). Для этой зоны характерны максимальные средние (медианные) концентрации Hg, Pb, As, Zn, Cr (относительно всех выделенных территориальных единиц участков). В 50-метровой области прилегающих территорий двух участков исследования максимальные средние концентрации характерны уже для Cd, Ni и Cu, активно накапливающихся на окислительном нейтральном геохимическом барьере, располагающемся в этой зоне. В 100-метровой зоне хром является единственным поллютантом, превышающим ПДК более чем в 2 раза. Также для этой области характерно достаточно высокое значение содержания мышьяка, в сравнении с грунтами, лежащими под бытовыми отходами, что также не противоречит концепции зональности состава литохимических вторичных ореолов рассеяния [11]. Отличительной особенностью свалки Сланцевского района является достаточно большой ореол загрязнения молибденом, выходящий за границы локализации свалочных грунтов. В целом к основным поллютантам на территории участков можно отнести Hg, Pb, Zn, Cr и Cu.

С целью количественной комплексной оценки уровня химического загрязнения эколого-геологических систем «полигон ТБО» были определены коэффициенты концентрации химических веществ (Кс) [12] и индексы суммарного загрязнения

($Z_{ст}$) с учетом классов токсичности тяжелых металлов (суммировались только коэффициенты <1), согласно ГОСТу 17.4.1.02-83 «Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения» [13]. В качестве фоновых значений были взяты концентрации элементов в зональных почвах, находящихся за пределами антропогенного воздействия.

Область с максимальными значениями суммарного показателя загрязнения $Z_{ст}$ находится в зоне локализации свалочных грунтов двух участков (рис. 5). Почвогрунты территории свалки поселка Красава относятся к категории «чрезвычайно опасная» ($Z_{ст}>128$), причем ореол загрязнения выходит за границы зоны складирования и распространяется в восточном направлении, согласно контуру окислительного нейтрального геохимического барьера (см. рис. 4).

Почвогрунты территории городской свалки Сланцевского района относятся к категориям «умеренно опасная» — «опасная». На схеме распределения суммарного показателя загрязнения с учетом токсичности элементов ореол категории «опасных» почвогрунтов, включает не только зону складирования, но и 50-метровую; в целом, как и на участке № 1, его границы совпадают с расположением окислительного нейтрального барьера (см. рис. 4, 5).

Полученные данные по участкам и мониторингу первого в течение нескольких лет подтверждают предположение о зональности свалок бытовых отходов и, следовательно, внесении определенных поправок в развитие новых подходов рекультивации, учитывая территориальные особенности миграции поллютантов. Что касается рационализации природопользования, по результатам исследований санитарно-защитную зону на объектах исследования следует уменьшить с 500 до 200 метров (подтверждается аппроксимацией данных с помощью линий тренда (см. рис. 3). На 100-метровом удалении от свалочных масс концентрации практически по

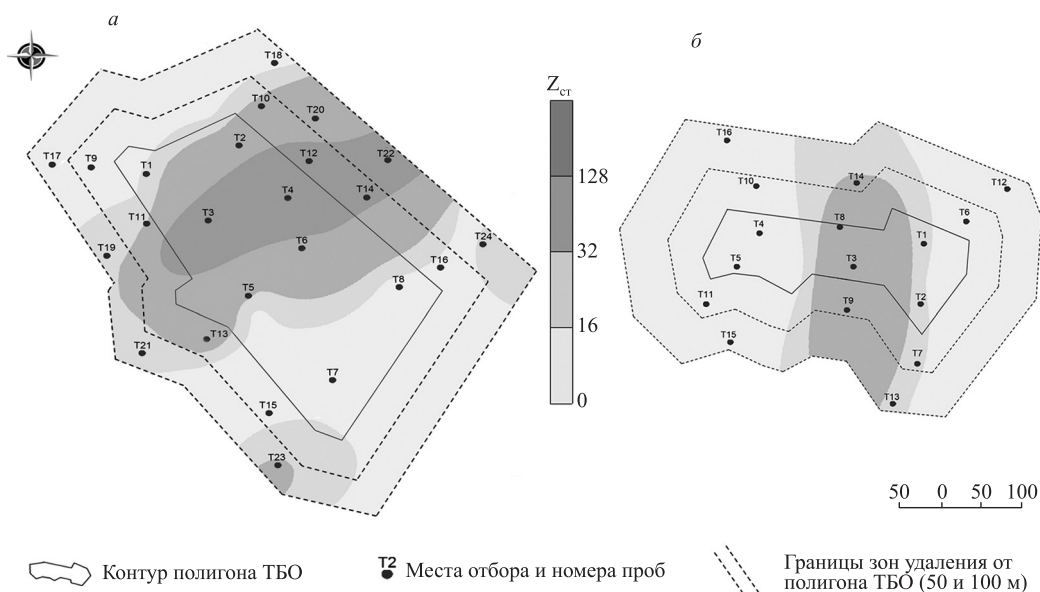


Рис. 5. Распределения суммарного показателя загрязнения с учетом классов опасности (а — полигон ТБО поселка Красава, б — городская свалка г. Сланцы)

всем элементам не превышают фоновых значений, а потенциальные геохимические барьеры находятся не далее 50-метровой зоны.

В настоящей работе апробирован новый научно-методологический подход к эколого-геохимической оценке природно-антропогенных систем на основе применения статистических методов анализа данных в комплексе с моделированием окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий. Данный метод оценки состояния природной среды в системе «свалочные массы тела полигона ТБО — окружающая среда» позволяет:

- уточнить общую геоэкологическую ситуацию и детализировать оценку степени и направления негативного антропогенного воздействия полигонов ТБО;
- выделить парагенетические ассоциации (описать конкордантность элементов), особенности миграции и концентрации элементов, свойственные определенному типу полигонов ТБО, схожих по геолого-морфологическим характеристикам;
- сравнивать полигоны ТБО по набору геолого-морфологических и эколого-геохимических параметров, тем самым, развивая концепцию типизации природно-техногенных тел, которыми являются свалки и полигоны ТБО;
- провести моделирование расположения геохимических барьеров системы «свалочный грунт — окружающая среда» и обосновать достаточные размеры и конфигурацию санитарно-защитных зон вокруг исследованных полигонов ТБО;
- подойти к разработке природоохранных рекомендаций по экологической безопасности полигонов ТБО с учетом их негативного воздействия на прилегающие территории.

Литература

1. Подлипский И. И. Эколого-геологическая характеристика полигонов бытовых отходов и разработка рекомендаций по рациональному природопользованию: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2010. 24 с.
2. Смирнов Б. И. Корреляционные методы при парагенетическом анализе. М.: «Недра», 1981. 176 с.
3. Мазуров М. П. Парагенетический анализ руд эндогенных месторождений. Новосибирск: Новосибир. гос. ун-т, 2007. 84 с.
4. Дубровский М. И. Парагенетический анализ минеральных ассоциаций гранитоидов. Л.: Наука, 1987. 256 с.
5. Ворошилов В. Г. Математическое моделирование в геологии: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2001. 124 с.
6. Дуброва С. В., Жданов С. В. Оценка геоэкологического состояния территории полигона ТБО поселка Красава Тихвинского района Ленинградской области // Известия РГПУ им. А. И. Герцена. Естественные и точные науки. 2012. № 153, вып. 2. С. 110–113.
7. Подлипский И. И. Полигон бытовых отходов как объект геологического исследования // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. 2010. Вып. 1. С. 15–31.
8. Глазовская М. А. Методологические основы оценки эколого-геохимической устойчивости почв к техногенным воздействиям. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1997. 102 с.
9. Перельман А. И. Геохимия. М.: Высшая школа, 1989. 528 с.
10. Куриленко В. В., Подлипский И. И. Совершенствование сети мониторинга полигонов твердых бытовых отходов (ТБО) в рамках эколого-геологических исследований / XIV Междунар. науч. симпозиум «Проблемы геологии и освоения недр». Томск, 2010.
11. Соловов А. П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. М., 1985. 151 с.

12. *Сает Ю.Е.* Геохимическая оценка техногенной нагрузки на окружающую среду // Геохимия ландшафтов и география почв. М.: МГУ, 1982. С. 37–48.

13. *Водяницкий Ю.Н.* Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. М.: ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН, 2008. 85 с.

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2013 г.

Контактная информация

Дуброва Станислав Викторович — аспирант; e-mail: dubrova.stanislav@gmail.com

Подлипский Иван Иванович — кандидат геолого-минералогических наук; e-mail: primass@inbox.ru

Dubrova S. V. — Post-graduate student; e-mail: dubrova.stanislav@gmail.com

Podlipskiy I. I. — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences; e-mail: primass@inbox.ru