

*На правах рукописи*

ЯЦУК АНДРЕЙ ВАДИМОВИЧ

**ГАЗОГЕОХИМИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ ПОЛИГОНА ТВЁРДЫХ  
БЫТОВЫХ ОТХОДОВ Г. ВЛАДИВОСТОКА**

Специальность: **25.00.36** – геоэкология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск – 2011

Диссертация выполнена в Учреждении Российской академии наук Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук,  
профессор **Обжиров Анатолий Иванович**

Официальные оппоненты: кандидат геолого-минералогических наук  
**Иванова Вера Леонидовна**  
(ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток)

доктор технических наук, профессор  
**Руш Елена Анатольевна**  
(ИГУПС, г. Иркутск)

Ведущая организация: **Учреждение Российской академии наук  
Тихоокеанский институт географии  
Дальневосточного отделения РАН  
(ТИГ ДВО РАН), г. Владивосток**

Защита состоится 14 октября 2011 г. в 10<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 003.059.01 при Учреждении Российской академии наук Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского 1а, факс: (3952) 42-70-50

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН

Автореферат разослан « 12 » сентября 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.г.-м.н.



Королева Г. П.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время объём твёрдых бытовых отходов (ТБО), поступающий в биосферу, достиг почти геологического масштаба и составляет около 400 млн. тонн в год (Лифшиц, 2000). Одним из основных способов удаления ТБО во всем мире остается захоронение в приповерхностной геологической среде. В этих условиях отходы подвергаются интенсивному биохимическому разложению с образованием свалочного газа (биогаза). К основным компонентам биогаза относят не только парниковые газы (метан и диоксид углерода), но и такие токсичные соединения как - оксид углерода, оксиды азота, сероводород, диоксид серы. В процессе термического воздействия и возгорания отходов выделяются канцерогенные соединения - бензол, бензапирен. Эмиссия свалочных газов, поступающих в окружающую среду, оказывает негативные эффекты как локального, так и глобального геоэкологического характера.

Качественные и количественные параметры эмиссии обусловлены объемом и вещественным составом отходов, степенью биогенной переработки и интенсивностью газотермохимических процессов, являющимися определяющими доминантами негативного воздействия на окружающую среду. Актуальность проблемы изучения газогеохимии свалочных газов не вызывает сомнений, в том числе и в южном Приморье, где располагается множество полигонов ТБО, наиболее значимым из которых по степени негативного воздействия на окружающую среду (более 50 % суммарных газовыбросов) является полигон г. Владивостока, на котором в 2010 году начаты рекультивационные работы. Газогеохимическими исследованиями установлены значительные объёмы образования метана, перспективные для извлечения. Их использование является актуальной экологической задачей утилизации свалочных газов, решающей комплексную проблему газобезопасности и уменьшения эмиссии газов в окружающую среду.

В свете обозначенных проблем, актуальность тематики исследований представляется своевременной для решения конкретных задач обеспечивающих улучшение экологической обстановки в регионе, в рамках программы подготовки к саммиту стран АТЭС во Владивостоке в 2012 г.

**Цель и задачи исследований.** Целью исследования является выявление пространственно-временных газогеохимических закономерностей в образовании и распределении газов полигона ТБО и оценка степени геоэкологического воздействия газовой эмиссии на окружающую среду. Исходя из цели, основными задачами исследований являлись:

- определение качественных и количественных газогеохимических показателей газовой эмиссии и фазового газогеохимического состояния полигона;
- установление влияния основных биохимических и термохимических процессов на образование и поступление газов в окружающую среду;
- анализ и оценка степени геоэкологической опасности эмиссии газов полигона ТБО;

- составление рекомендаций для решения проблем геоэкологической и газовой безопасности в процессе рекультивации и закрытия полигона.

**Методы исследований** включали: газогеохимические исследования, хроматографические и газоаналитические работы; комплексный анализ газогеохимических и генетических показателей газов; методы математического моделирования пространственного распределения газов полигона ТБО; обработку и обобщение научно-технических, и литературных источников по проблеме исследований.

#### **Основные защищаемые положения.**

**1.** Свалочный газ полигона ТБО г. Владивостока, состоящий из: метана до 55 %, углекислого газа до 22 %, водорода до 0,32 %, окиси углерода до 0,1 %, диоксида серы до 0,002 %, сероводорода до 0,002 %, окислов азота до 0,001 %, бензола, бенз(а)пирена и углеводородных газов, представляет комплексную геоэкологическую опасность.

**2.** Установлено два основных генетических источника образования газов: биохимический и термохимический, в совокупности образующие полигенетическую газовую смесь в верхнем горизонте отходов полигона.

**3.** Показатель молекулярной массы  $M_{УВ}$  и весовые концентрации углеводородных компонентов ряда  $C_2 - C_6$  являются основными газогеохимическими индикаторами фазового состояния полигона ТБО в процессе физико-химической трансформации твёрдых бытовых отходов.

#### **Научная новизна.**

- Впервые в регионе применены методы газогеохимической и генетической идентификации индивидуальных компонентов свалочного газа, а также биохимических и термохимических условий их образования.
- Установлены основные закономерности распределения газогеохимических полей и фазового состояния полигона ТБО.
- Определена степень геоэкологического воздействия на окружающую среду и масштабы генерации парниковых, вредных и токсичных газов.

**Достоверность и обоснованность результатов** подтверждается современным уровнем применявшегося для газогеохимических исследований отечественного и зарубежного хроматографического оборудования, методов отбора и дегазации проб. Исходные материалы получены на основании собственных авторских исследований, представленных в научно-исследовательских отчётах и рабочих проектах, прошедших государственную экспертизу, на основании которой данные исследований признаны достоверными и обоснованными.

#### **Практическая значимость работы.**

- Результаты исследований использованы в курсе авторских лекций и практических занятий для подготовки специалистов-геоэкологов на кафедре геофизики и геоэкологии ИИСЭ ДВГТУ.
- Предложены рекомендации по утилизации и промышленному использованию биогаза полигона ТБО, с целью обеспечения

газобезопасности и улучшения геоэкологического состояния окружающей среды.

- Результаты авторских газогеохимических исследований вошли в основу проекта по рекультивации полигона ТБО г. Владивостока.
- Рекомендации по снижению газоопасности на полигоне и прогнозу газовыбросов в атмосферу были переданы в «Единую дирекцию по строительству объектов на территории Приморского края» в рамках подготовки к проведению саммита АТЭС 2012.

**Личный вклад автора.** Автором лично проведены работы по газогеохимическому мониторингу на полигоне ТБО в период с 2008 по 2011 год. Результаты, составляющие газогеохимическую основу диссертационной работы, получены автором самостоятельно.

**Апробация и публикации.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на Региональных и Всероссийских конференциях во Владивостоке (2008 – 2011 года); на Международных конференциях в Китае (г. Чан-Чунь, 2008 г.), в Москве (2009 г.). Результаты исследований отражены в 10 работах, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК – две публикации.

**Объём и структура работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, рекомендаций и заключения, изложенных на 144 страницах, включая список литературы из 73 наименований, 54 иллюстрации и 19 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведены данные об актуальности и состоянии проблемы исследования. В данном разделе определены цели и задачи работы, раскрыта научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** дан краткий обзор мирового опыта по изучению эмиссии газов с полигонов твёрдых бытовых отходов. Рассмотрены пути утилизации биогаза в народном хозяйстве и российские исследования в данном направлении.

**Во второй главе** представлен метод использованный автором при проведении эколого-газогеохимических работ на объекте исследования. Газогеохимический метод, использованный при изучении газовой эмиссии полигона ТБО г. Владивостока, был создан, усовершенствован и отработан лабораторией газогеохимии ТОИ ДВО РАН под руководством д.г.-м.н. Обжирова А.И. Методика работ сводится к следующим операциям: отбору пробы, извлечению из неё газа, анализу газа, компьютерной обработке, эколого-газогеохимической интерпретации данных. Определение основных газовых компонентов проводилось на отечественном хроматографе «КристалЛюкс - 4000М».

**В третьей главе** приводится краткое описание природно-климатических и техногенных условий эксплуатации полигона ТБО, морфологический состав складированных отходов. Рассмотрено геологическое и гидрогеологическое строение территории исследований. Проведён анализ экологического состояния компонентов окружающей среды в районе полигона ТБО г. Владивостока.



**Рис. 1.** Обзорная схема полигона твёрдых бытовых отходов г. Владивостока.

Полигон твёрдых бытовых отходов г. Владивостока расположен на побережье бухты Безымянной Уссурийского залива в урочище Мертвая падь. Участок исследований территориально относится к Ленинскому району г. Владивостока. В 250 м к юго-западу от него расположен посёлок Рыбачий, а в 2-2,5 км посёлок Горностай. Полигон ТБО действует с 1967 года, эксплуатируется с нарушением природоохранных и санитарно-гигиенических требований и наносит огромный экологический ущерб окружающей природной среде города. Размещение в водоохранной зоне Уссурийского залива приводит к загрязнению морской акватории и донных отложений (рис.1).

Геолого-литологический разрез района расположения полигона ТБО сложен нижнетриасовой толщей песчаников и конгломератов ( $T_1pk$ ), перекрытой с поверхности четвертичными делювиальными ( $dQ$ ), морскими ( $mQIV$ ) и техногенными (насыпными) образованиями ( $tQIV$ ), местами почвенно-растительным слоем («ПриморТИСИЗ», 2008). Современные техногенные образования ( $tQIV$ ) представлены минерализованными грунтами с остатками неразложившегося и свежего мусора. В процессе эксплуатации полигона свалочные грунты были подвержены самовозгоранию. Общая мощность насыпных грунтов от 0,4 до 36,6 м.

По результатам гидрогеологических исследований («ПриморТИСИЗ», 2008) на полигоне ТБО выделены постоянно действующие подземные воды верхней трещиноватой зоны нижнетриасовых осадочных пород ( $T_1pk$ ). Подземные воды вскрыты на глубине 4,5-7,0 м (абс. отм. 7,03-23,72 м) у подножия свалки. Вскрытая мощность водоносной зоны 5,5-11,5 м. Питание водоносного комплекса происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков в местах выхода коренных пород на дневную поверхность, разгрузка осуществляется в море. Подземные воды верхней трещиноватой зоны

нижнетриасовых осадочных пород незащищены от проникновения загрязнения. Основное загрязнение подземных вод может происходить за счёт инфильтрации с поверхности в периоды снеготаяния и выпадения обильных ливневых дождей.

Анализ экологического состояния компонентов окружающей среды в районе полигона твёрдых бытовых отходов г. Владивостока показал высокий уровень загрязнения. Многолетняя эксплуатация полигона с нарушением всех природоохранных нормативов, в совершенно непредназначенном для этого месте, привела к загрязнению почвенного покрова, подземных вод, морской среды и донных отложений.

Техногенные грунты полигона ТБО загрязнены тяжёлыми металлами (Pb, Zn, Cu, Cd, Ni). По данным В. В. Калинчука, вся площадь полигона относится к чрезвычайно опасной категории загрязнения (суммарный показатель загрязнения СПЗ > 128). Содержание свинца в грунтах свалки превышает установленный норматив для почвы населённых мест в среднем в 26 раз, цинка – в 39, меди – в 37, кадмия – в 3,6, никеля – в 5 раз. В связи с ветровым разносом, почвенный покров окрестной территории также подвержен загрязнению. Тяжёлые металлы накапливаются в основном в толще отходов, содержание их в грунтовых водах и фильтрате полигона невелико. Фильтрат полигона содержится в небольших количествах и загрязнен хлоридами, сульфатами, кальцием, магнием, органическими веществами и железом.

Постоянные геодинамические процессы разрушения берегового борта полигона ТБО привели к поступлению загрязняющих веществ в морскую среду и донные осадки Уссурийского залива и разносу на дальние расстояния. Морские донные отложения вблизи береговой линии на расстоянии до 1 км от полигона ТБО загрязнены тяжёлыми металлами (Hg, Pb, Zn, Cd, Cu, Cr, Ni, Co, Mo, Ba, Sn). Опасная категория загрязнения донных отложений медью прослеживается в южном направлении от полигона до бухты Горностай.

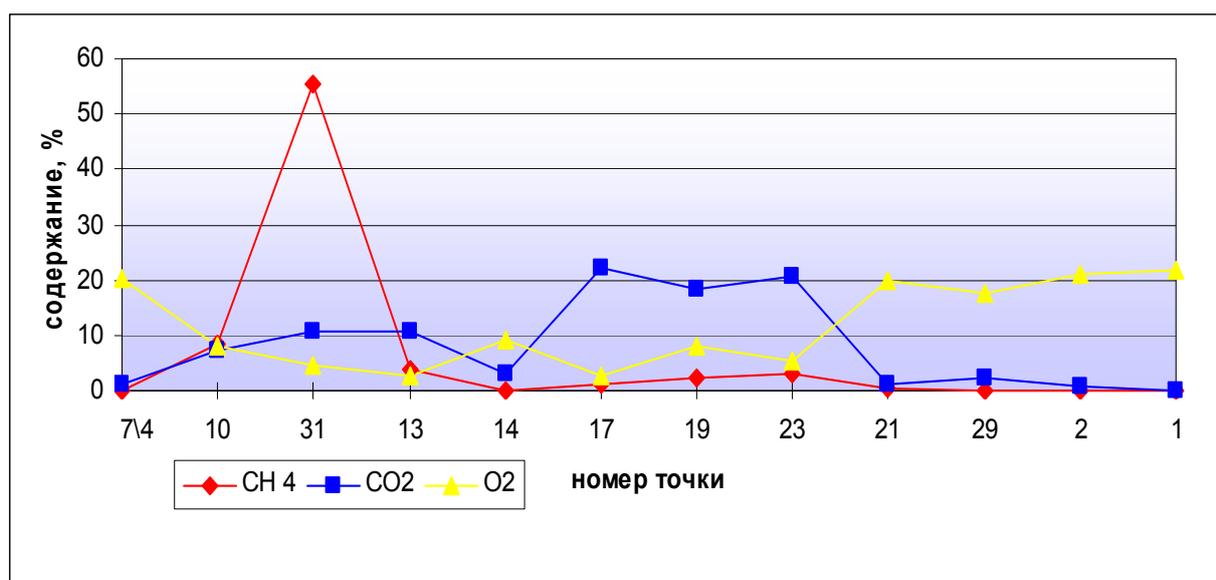
Морская вода, вследствие загрязнения донных отложений и прямого попадания в нее техногенных грунтов вблизи полигона и на расстоянии до 2 км вдоль береговой линии от него загрязнена взвешенными веществами, тяжёлыми металлами (Pb, Cu). Кроме этого, в прибрежной зоне от б. Горностай до б. Десантная наблюдается загрязнение фенолами и сильно нефтепродуктами. По результатам мониторинга Приморского УГМС в 2009 и 2010 году установлено, что по рассчитанному индексу загрязнения морские воды в зоне влияния полигона относятся к V классу (грязная). Очевидно, что загрязнение с превышением ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения негативно сказывается на качестве морских вод, ухудшает рекреационный потенциал акватории залива и создает неблагоприятные условия для обитающих в прибрежной морской акватории биоресурсов.

**В четвертой главе** приведены результаты эколого-газогеохимической оценки газовыбросов полигона ТБО. Исследован состав, распределение и объёмы образования компонентов газовой эмиссии. Рассмотрены особенности геоэкологического воздействия на компоненты окружающей среды и степень эколого-газогеохимической опасности газовыбросов.

**Свалочный газ полигона ТБО г. Владивостока, состоящий из: метана до 55 %, углекислого газа до 22 %, водорода до 0,32 %, окиси углерода до 0,1 %, диоксида серы до 0,002 %, сероводорода до 0,002 %, окислов азота до 0,001 %, бензола, бенз(а)пирена и углеводородных газов, представляет комплексную геоэкологическую опасность (первое защищаемое положение).**

В составе газовой эмиссии полигона установлены следующие основные компоненты: метан, углекислый газ, азот, кислород ( $\geq 1\%$ ). Концентрации  $\text{CH}_4$  в интервале глубин 0,8 – 1 м верхнего горизонта отходов изменялись от 0,0059 до 55,332 %;  $\text{CO}_2$  – от 1,31 до 22,05 %;  $\text{O}_2$  – от 1,93 до 19,88 %.

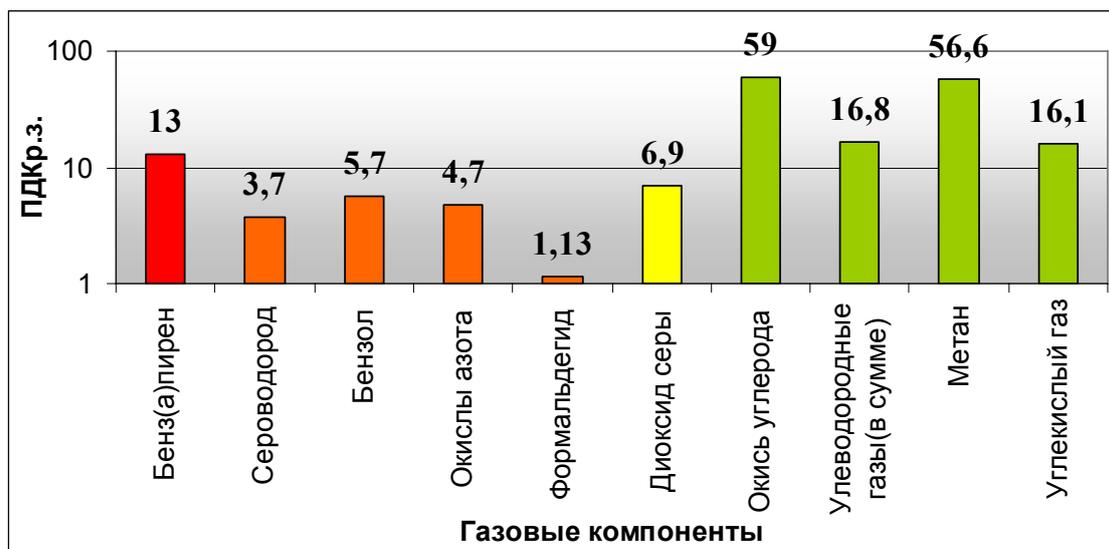
Исследованиями обнаружена постоянная эмиссия метана в верхние горизонты отходов по всей площади полигона. Наибольшие концентрации  $\text{CH}_4$  наблюдаются в восточной части полигона, в направлении юго-западной части концентрации метана уменьшаются, зато существенно возрастают концентрации  $\text{CO}_2$  (рис. 2). Концентрация  $\text{O}_2$  приближается к воздушной по бортам полигона. На самом полигоне за счёт развития процессов окисления органики, тления и возгорания отходов концентрации кислорода существенно ниже.



**Рис. 2.** Распределение основных компонентов газовой эмиссии полигона ТБО по профилю точек № 7/4 (восточная часть полигона) – № 21 (юго – западная часть полигона).

Исследованный газ полигона ТБО содержит также макропримеси: водород (от 0,01 до 0,32 %), углеводородные газы (в сумме от 0,0002 до 0,83954 %); микропримеси: оксид углерода (0,0012 - 0,094 %), оксид и диоксид азота (0,0002 - 0,0016 %), сероводород и диоксид серы (от 0,0002 до 0,0024 %), бензол (0,0002 – 0,0096 %). В 2009 году исследованиями лаборатории ЦЛАТИ было установлено существенное загрязнение атмосферного воздуха рабочей зоны полигона и прилегающей территории бенз(а)пиреном, формальдегидом и другими опасными веществами, выделяющимися в результате возгорания отходов.

В составе газовой эмиссии полигона ТБО обнаружено присутствие газообразных веществ, всех классов опасности (рис. 3).



**Рис. 3.** Максимально разовые превышения ПДКр.з. полигона ТБО (ГН 2.2.5.1313-03).  
Условные обозначения: красный цвет – 1 класс опасности; оранжевый – 2 класс опасности; жёлтый – 3 класс опасности; зелёный – 4 класс опасности.

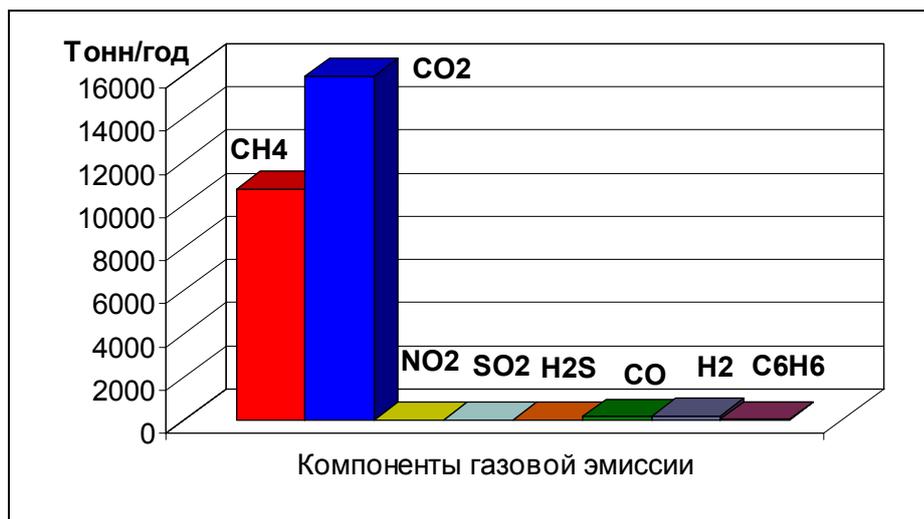
Потенциальный вред, вызванный эмиссией свалочных газов, может быть разделен на несколько категорий: 1) физиологический; 2) экологический; 3) физический; 4) канцерогенный.

Исследованиями установлено, что 90 % площади полигона относится по газоопасности к потенциально опасной и опасной (пожароопасной). В 2008 году в пределах рабочей зоны полигона выделено 2 участка с взрывоопасными концентрациями метановоздушной смеси в верхнем горизонте отходов.

Расчёт объёмов выброса основных компонентов биогаза в атмосферу был выполнен с использованием результатов авторских газогеохимических исследований и методических рекомендаций академии коммунального хозяйства им. К.Д. Панфилова (г. Москва). В результате расчёта принимались во внимания особенности климатических условий региона, морфологический состав и газогенерирующие свойства грунтов полигона.

Суммарное количество образования биогаза на действующем полигоне составляло 26 889,4 т/год. Основная доля выбросов приходилась на диоксид углерода - 15 947,9 т/год и метан – 10 695 т/год (рис. 4).

В 2010 году, в результате исследования состава водорастворённых газов морской акватории Уссурийского залива, омывающей полигон ТБО, установлено наличие аномальных газогеохимических полей метана. Был проведён поквартальный (весна, лето, осень) отбор проб морской воды по двум створам (прибрежный и на расстоянии 500 м от полигона). Всего проанализировано 40 проб. Отбор осуществлялся батометром с двух горизонтов (поверхностный и придонный) по отработанной в лаборатории газогеохимии ТОИ ДВО РАН методике.



**Рис. 4.** Количественные показатели газовой эмиссии полигона ТБО.

Фоновые концентрации метана в морских водах Уссурийского залива составляют 100-120 нл/л (Мишукова, 2007).

В результате исследований концентрации  $\text{CH}_4$  в прибрежном створе вблизи полигона превышали фоновые показатели независимо от времени года. Концентрация метана в поверхностном слое изменялась в пределах от 237 до 978 нл/л, придонном от 239 до 468 нл/л. Наличие повышенного содержания метана в морской воде и увеличение его концентраций по мере приближения к расположению полигона говорит об источнике поступления, связанном с процессами газообразования на полигоне ТБО.

Образующийся на полигоне биогаз, насыщает метаном подземные воды и может мигрировать в прибрежную морскую акваторию. Другим источником повышенных концентраций метана могут быть донные осадки прибрежной акватории, в которых происходит накопление и разложение мусора органического происхождения поступающего с территории полигона. Полученные выводы подтверждаются исследованиями газовой фазы донных осадков прибрежного профиля Уссурийского залива. Так, средняя концентрация метана в газовой фазе донных осадков вне прямого влияния полигона ТБО составляет 0,02 %. В районе расположения полигона концентрации  $\text{CH}_4$  в осадке достигают 0,4 % (Алтыков, 1994). Это может говорить о прямом влиянии полигона ТБО на формирование газового режима прибрежной акватории и донных осадков.

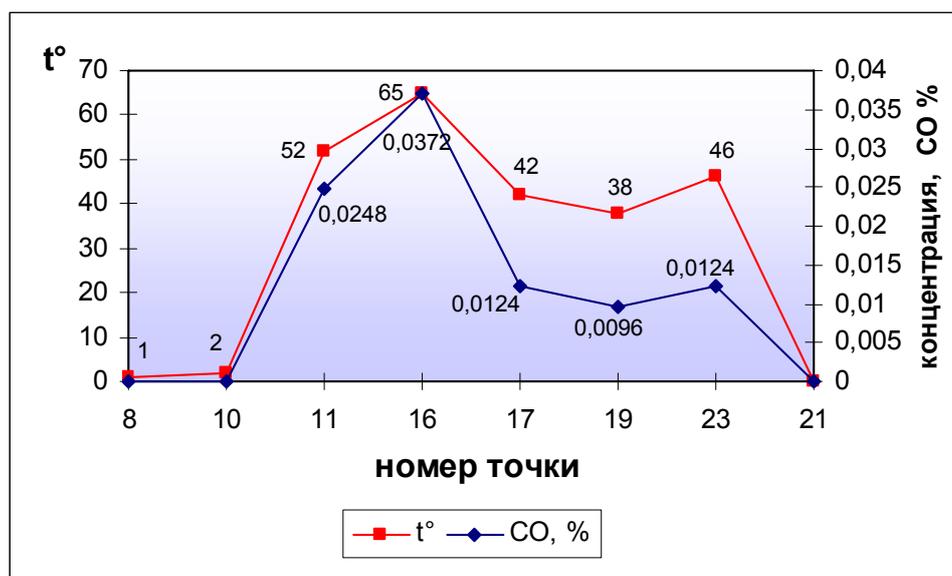
Рассмотренный в данной главе качественный и компонентный состав газовой выбросов полигона показывает наличие в составе газовой эмиссии полигона ТБО вредных, пожаровзрывоопасных, токсичных и канцерогенных газов всех классов опасности. Образование значительного количества биогаза и его миграция в подпочвенный слой, атмосферу, морскую среду представляет существенную геоэкологическую опасность. Его формирование и выделение в окружающую среду оказывает не только комплексное загрязнение компонентов природной среды, но и представляет существенную опасность для рабочего персонала полигона и местного населения, как в настоящее время, так и после закрытия полигона.

**Пятая глава** посвящена изучению генетических источников и газогеохимических особенностей газообразования на полигоне ТБО. Подробно рассмотрен термический режим и фазовое газогеохимическое состояние полигона в процессе физико-химической трансформации отходов.

**Установлено два основных генетических источника образования газов: биохимический и термохимический, в совокупности образующие полигенетическую газовую смесь в верхнем горизонте отходов полигона (второе защищаемое положение).**

Исследованиями установлено, что термический режим полигона выступает в роли основного термохимического источника образования определённых токсичных и канцерогенных компонентов газовой эмиссии полигона ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , бензапирен, бензол). В процессе эксплуатации полигона ТБО отходы круглогодично были подвержены процессам горения и тления. Основной причиной изотермических аномалий температуры поверхностных свалочных грунтов, их возгорания и тления являлось несоблюдение технологических требований эксплуатации полигона.

На примере окиси углерода установлена прямая генетическая связь образования и роста концентраций  $\text{CO}$  в зависимости от температуры свалочных грунтов (рис. 5).



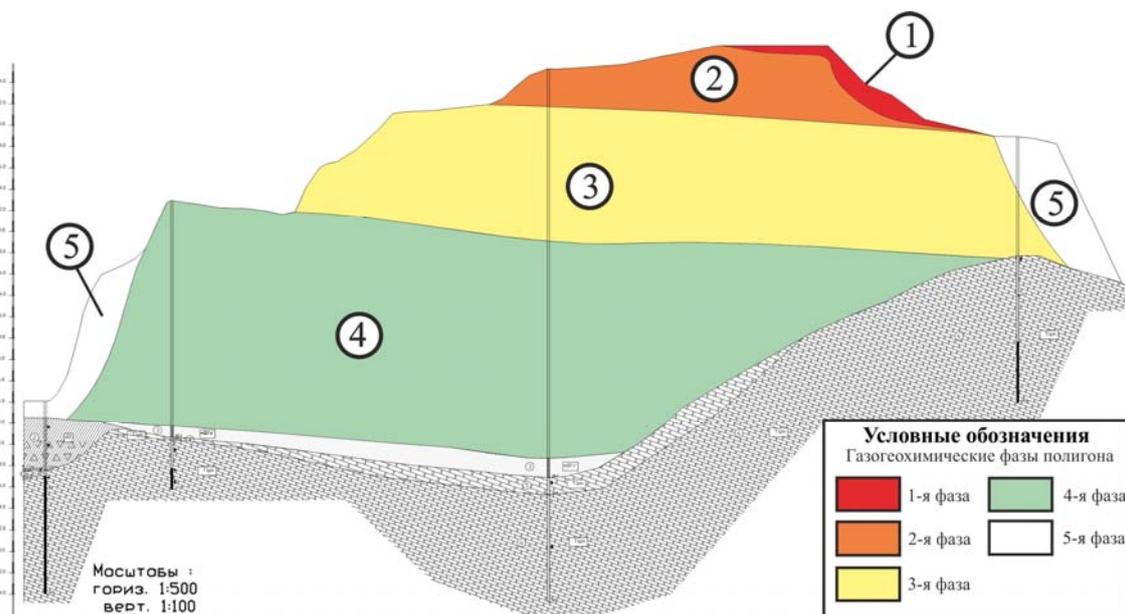
**Рис. 5.** Распределение температуры свалочных грунтов полигона и концентрации  $\text{CO}$  по профилю контрольных точек № 8 (восточная часть полигона) – № 21 (юго - западная часть полигона).

Подпочвенный слой и грунты вне рабочего контура полигона характеризуются отсутствием в них окиси углерода и температурой близкой к температуре атмосферы. Температурный порог образования окиси углерода с концентрацией более  $5 \text{ мг/м}^3$  составил в среднем по полигону  $17^\circ\text{C}$ . Суммарная эмиссия  $\text{CO}$  из верхних слоёв свалочного грунта полигона ТБО г. Владивостока составляла  $157,5$  тонн/год.

Другим основным генетическим источником газообразования на полигоне являются процессы биохимического разложения отходов. Присутствие газов характерного биохимического происхождения подтверждается данными изотопного состава углерода метана и углекислого газа отобранных проб биогаза. На полигоне ТБО значения  $\delta^{13}\text{C}$   $\text{CH}_4$  изменялись от -30,1 до -61,9 ‰ (в среднем -50 ‰),  $\delta^{13}\text{C}$   $\text{CO}_2$  от -25,2 до -41,6 ‰ (в среднем -32,9 ‰). В пределах восточной части полигона значения  $\delta^{13}\text{C}$   $\text{CH}_4$  имели облегченный состав, характерный биохимическим газам микробного генезиса. В центральной и юго-западной части полигона наблюдается утяжеление изотопного состава углерода метана, обусловленное повышенным бактериальным и термическим окислением  $\text{CH}_4$ .

В пределах полигона ТБО выделено пять фазовых газогеохимических состояний преобразования отходов (рис. 6):

- I газогеохимическая фаза (аэробное разложение);
- II газогеохимическая фаза (анаэробное разложение - кислое брожение);
- III газогеохимическая фаза (анаэробное разложение с непостоянным выделением метана - смешанное брожение);
- IV газогеохимическая фаза (анаэробное разложение с постоянным выделением метана);
- V газогеохимическая фаза (затухание анаэробных процессов).



**Рис. 6.** Фазовые газогеохимические состояния полигона в разрезе по линии I – I (рис. 1).

Основным газогенерирующим горизонтом полигона являются отходы, залегающие в его основании, представленные IV газогеохимической фазой. Борты полигона и давно отработанные участки характеризуются минимальным газообразованием, и находятся в V стадии анаэробного затухания. Процессы анаэробного разложения отходов, бактериального, термохимического и аэробного окисления, а также термический режим полигона приводят к

формированию полигенетического газового состава в верхнем горизонте отходов.

Газогеохимические показатели углеводородных газов (УВГ) полигона исследовались на основании определения молекулярной массы  $M_{УВ}$ , весовых концентраций (доли на 1000) углеводородных компонентов и газогенетических коэффициентов. Для всех газогеохимических фаз преобразования отходов полигона установлены характерные значения  $M_{УВ}$  и весовых концентраций углеводородной фракции (рис. 7).

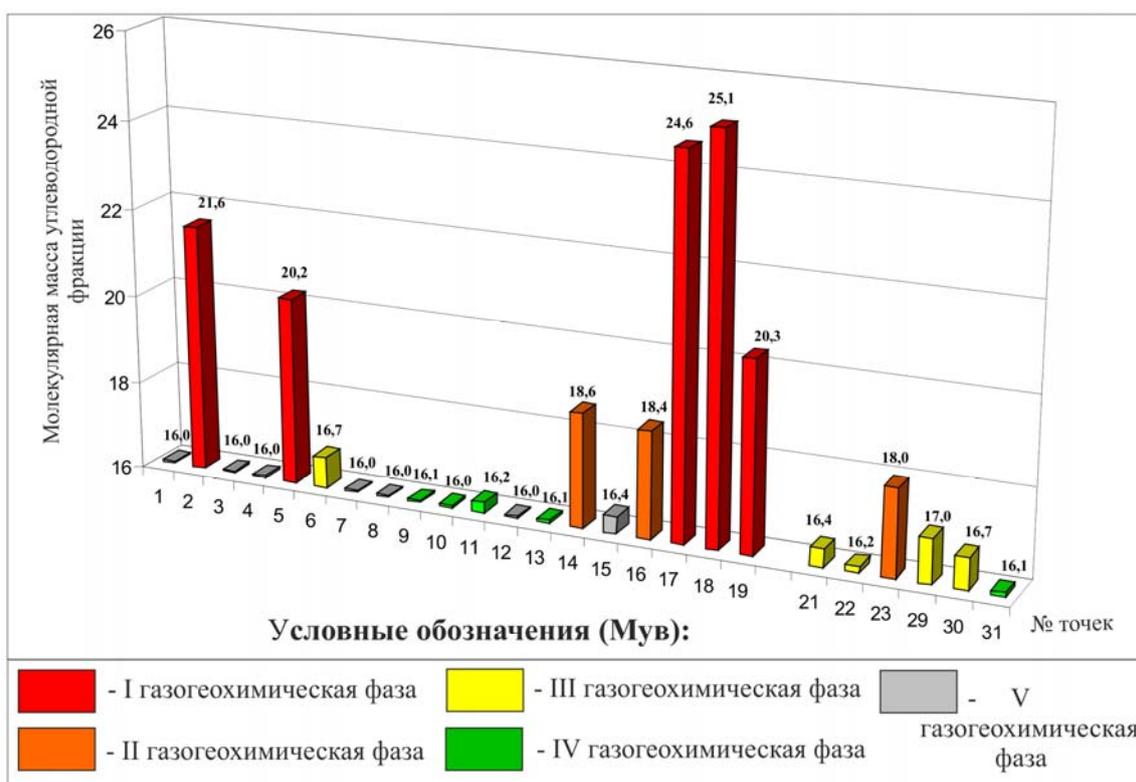


Рис. 7. Показатели  $M_{УВ}$  углеводородной фракции газогеохимических фаз полигона ТБО.

Наибольшие значения  $M_{УВ}$  и весовые концентрации углеводородных компонентов ряда  $C_2 - C_6$  обнаружены на стадии аэробного разложения отходов (I газогеохимическая фаза), минимальные на стадии затухания (V газогеохимическая фаза) (табл. 1).

Газогенетические показатели УВГ газогеохимических фаз полигона ТБО  
г. Владивостока

Таблица 1

Газогеохимическая фаза полигона ТБО	$M_{УВ}$ (ср. значения)	Весовые концентрации УВГ (ср. значения)					
		$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
I газогеохимическая фаза	22,40	560	110	167	127	34	2
II газогеохимическая фаза	18,34	811	29	53	97	7	4
III газогеохимическая фаза	16,60	946	12	30	10	2	-
IV газогеохимическая фаза	16,10	993	3	3	1	-	-
V газогеохимическая фаза	16,09	995	2	3	-	-	-

Другой специфической особенностью распределения УВГ полигона ТБО является незакономерное распределение весовых долей углеводородных газов ряда  $C_2-C_6$  в виде  $C_2 < C_3 > C_4 > C_5 > C_6$  в большинстве анализированных проб, при этом в I и II газогеохимических фазах  $C_2 < C_4$  (рис. 8). Подобные соотношения между соседними углеводородными компонентами и значительные вариации весовых концентраций подтверждают выводы о полигенезисе газового состава в верхнем горизонте отходов полигона.

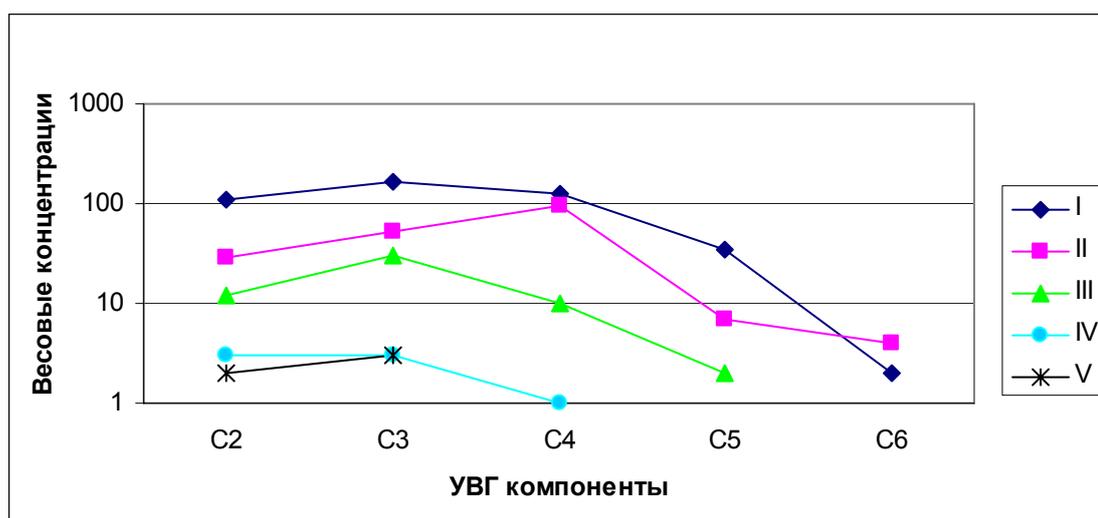


Рис. 8. Весовые доли углеводородных газов ряда  $C_2-C_6$  газогеохимических фаз полигона ТБО.

Более того, в природных условиях подобные соотношения УВГ характерны для углеводородных газов нефтегазовых и газонефтяных залежей (Гресов, 2011). Причиной обнаруженных соотношений УВГ на полигоне является наличие в составе отходов продуктов промышленного синтеза нефтепродуктов (пластик, целлофан, резина и др.). Термохимическое преобразование которых, на начальных стадиях разложения, приводит к образованию и характерному соотношению углеводородных газов нефтяного ряда.

Исследование закономерностей изменения количественных и газогенетических показателей УВГ газов полигона ТБО установило близкие значения газогенетических коэффициентов, присущие скоплениям жирных газов. Углеводородные газы полигона могут быть объединены в одну газогенетическую группу с характерными особенностями образования и соотношения газовых компонентов.

Данные, приведённые в пятой главе, подтверждают **третье защищаемое положение**: *показатель молекулярной массы  $M_{УВ}$  и весовые концентрации углеводородных компонентов ряда  $C_2 - C_6$  являются основными газогеохимическими индикаторами фазового состояния полигона ТБО в процессе физико-химической трансформации твёрдых бытовых отходов.*

**Шестая глава** посвящена газогеохимическим исследованиям в процессе рекультивации и закрытия полигона. Приведены рекомендации по дальнейшему исследованию и возможностям утилизации биогаза полигона ТБО с целью снижения негативного воздействия на окружающую природную среду.

Необходимость закрытия и рекультивации существующего полигона ТБО г. Владивостока назревала долгие годы. Работы по рекультивации начались в 2010 году и стали частью программы подготовки городского округа к проведению саммита стран АТЭС 2012 года. В начале 2011 года по завершению технического этапа рекультивации на полигоне были оборудованы 8 дегазационных скважин. Газогеохимические исследования в период 2010-2011 годов позволяют говорить о том, что полигон ТБО остаётся серьёзным газоопасным объектом, нуждающимся в постоянном контроле и мониторинге с целью изучения процессов выделения биогаза и обеспечения газобезопасности.

Перекрытие основной площади полигона глиняным экраном (саркофагом) привело к усилению процессов газообразования на полигоне. Формирование благоприятных анаэробных условий в толще отходов привели к росту метаногенерации и активной миграции биогаза в окружающую среду.

В составе свободных газовыделений газодренажных скважин полигона были установлены следующие компоненты:  $\text{CH}_4$  - от 7,1 до 77,8 %;  $\text{N}_2$  - от 6,8 до 59,6 %;  $\text{CO}_2$  - от 15,3 до 40,6 %; углеводородные газы - в сумме до 0,0238 %. Индикаторными трубками установлено наличие  $\text{CO}$  - от 10 до 40 мг/м<sup>3</sup> (2 ПДКр.з.) и  $\text{H}_2\text{S}$  - от 5 до 100 мг/м<sup>3</sup> (10 ПДКр.з.). Температура газового потока на выходе из скважин изменялась в пределах от + 26 до + 50 °С. Суммарный дебит всех дегазационных скважин весной 2011 года составлял 770 - 925 м<sup>3</sup>/час. Основное выделение метана зафиксировано в восточной и центральной части полигона ТБО. По предварительным данным, суммарное газовыделение  $\text{CH}_4$  только с дегазационных скважин полигона составляет порядка 2,5 млн. м<sup>3</sup>/год. Прогнозные расчёты объёмов газообразования с применением математической модели LandGEM 3.02 Американского агентства по охране окружающей среды (US EPA) показали, что ещё как минимум на протяжении 20-30 лет эмиссия метана будет находиться на высоком уровне.

Пути миграции для биогаза в атмосферу, помимо оборудованных дегазационных скважин, могут служить борта полигона и локальные места разуплотнения перекрывающего покрытия. Так, газогеохимическими исследованиями в 2011 году было выявлено 3 участка газодинамического нарушения перекрывающего слоя полигона. Они были представлены локальными парообразными, с температурой от + 34 до + 62,5 °С, выходами биогаза на поверхность. Анализ компонентного состава газовыделений показал наличие:  $\text{CH}_4$  - от 3,3 до 6,5 %;  $\text{CO}_2$  - от 5,8 % до 12,7 %;  $\text{O}_2$  - от 12 до 16,9 %;  $\text{N}_2$  - от 67,6 до 73,9 %; сумма УВГ ( $\text{C}_2$ - $\text{C}_5$ ) - от 0,0009 до 0,0022 %;  $\text{CO}$  - от 2 до 10 мг/м<sup>3</sup>;  $\text{H}_2\text{S}$  - до 2 мг/м<sup>3</sup>. В результате исследований было обнаружено 2 локальных участка в районе западного борта восточной и центральной части полигона с пожаровзрывоопасными и опасными концентрациями метановоздушной смеси в верхнем горизонте грунтов и приземной атмосфере.

Международный опыт эксплуатации и рекультивации полигонов показывает, что единственный способ прекращения выделения в атмосферу биогаза – это его организованное удаление через систему скважин и коллекторов с последующей утилизацией и использованием в народном хозяйстве. Основным методом, обеспечивающим решение этой задачи, является принципиальная схема сбора и утилизации биогаза (рис. 9):

- создание сети вертикальных газодренажных скважин, соединяющихся линиями газопроводов;
- в зависимости от количества скважин на полигоне ставятся коллектора для сбора газа, насосно-компрессорное оборудование для принудительной откачки газа и его компримирования;
- установка оборудования для предварительной очистки биогаза от силиконов, сероводорода, углекислого газа, вредных примесей и влаги для последующей утилизации.



Рис. 9. Схема использования и утилизации биогаза (Гурвич, 2001).

В связи с вышеизложенными фактами после закрытия полигона ТБО г. Владивостока рекомендуется проведение следующих мероприятий:

- организация газогеохимического мониторинга сети газодренажных скважин с целью уточнения объёмов эмиссии, оценке дебита и компонентного состава биогаза;
- ограждение территории закрытого полигона от свободного посещения в целях обеспечения газобезопасности. Оповещение населения о существующей газогеохимической опасности для предотвращения возможных несчастных случаев.
- организация опытно-исследовательской базы для сбора и утилизации биогаза. При этом на основе газогеохимических исследований определить

экономически выгодную возможность промышленного использования ресурсов биогаза полигона.

В перспективе, собранный и очищенный биогаз может быть использован в различных областях народного хозяйства региона:

- энергетике (использование в качестве топлива для газовых двигателей и турбин, когерационных установок с целью получения электроэнергии и тепла). Для выработки 1 МВт энергии необходима подача биогаза в количестве 525 м<sup>3</sup>/ч.;
- теплоэнергетике (сжигание в инфракрасных нагревателях с целью получения тепла и обогрева жилых и производственных помещений, теплиц и т.д.);
- обогащение и использование в качестве моторного топлива (возможное переоборудование мусороборочной техники на газ и создание АГЗ на территории старого полигона);
- химической промышленности (производство метанола);
- факельное сжигание (торговля квотами на выброс парниковых газов в рамках Киотского протокола);
- обогащение метаном до 94 - 95 % и использование в качестве бытового газа для нужд местного населения.

Наиболее перспективным направлением утилизации биогаза полигона автору представляется его использование в качестве теплоносителя (инфракрасные нагреватели или когенерация) или создание собственного энергоемкого производства с выпуском рентабельной продукции – например, тепличного хозяйства. Альтернативой может стать какое-либо другое производство, которое способно использовать дешевую энергию утилизации биогаза с еще большим эффектом. Кроме этого, коммерчески выгодным, бездотационным и рентабельным на сегодняшний день представляется утилизация биогаза в качестве парникового газа в рамках Киотского протокола. Экономическая эффективность проектов, предусматривающих использование свалочного газа для выработки электроэнергии, в современных российских условиях при отсутствии государственной поддержки маловероятна. При этом любые способы утилизации должны осуществляться в рамках полной экологической безопасности и защиты окружающей среды от вторичного загрязнения в результате сжигания или переработки свалочных газов.

Процессы образования биогаза будут продолжаться десятки лет после закрытия полигона в количествах способных нанести ощутимый ущерб окружающей природной среде. Реализация мероприятий по сбору и утилизации газовыбросов полигона при должной организации позволит уменьшить выбросы в атмосферу, улучшит экологическое состояние окружающей среды, принесет экономическую и социальную пользу. А в преддверии проведения саммита стран АТЭС 2012 может принести дополнительные инвестиции в бюджет г. Владивостока.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая диссертационная работа является научным трудом, в котором автором решается актуальная задача исследования пространственно-временных газогеохимических закономерностей в образовании и распределении газов полигона твёрдых бытовых отходов г. Владивостока, определения геоэкологического воздействия газовой эмиссии на компоненты окружающей природной среды, возможность утилизации свалочных газов.

Основные выводы, научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

- Впервые проведены комплексные эколого-газовые исследования распределения газогеохимических полей и общего загрязнения окружающей среды во время эксплуатации, рекультивации и после закрытия полигона твёрдых бытовых отходов.
- Определена степень геоэкологического воздействия на окружающую среду и масштабы генерации парниковых, вредных и токсичных газов.
- Установлены основные генетические источники газообразования и особенности фазового газогеохимического состояния полигона ТБО.
- Впервые в регионе применены методы газогеохимической и генетической идентификации индивидуальных компонентов биогаза, а также биохимических и термохимических условий их образования.
- Определены основные газогеохимические индикаторы ( $M_{ув}$ , весовые концентрации УВГ) фазового состояния полигона в процессе физико-химической трансформации твёрдых бытовых отходов.
- Предложены рекомендации по утилизации и использованию свалочного газа, в качестве нетрадиционного вида углеводородного сырья, с целью обеспечения газобезопасности и улучшения геоэкологического состояния окружающей среды.

### Основные публикации по теме диссертации

1. Яцук А.В. Поля метана юго-западного Приморья и их влияние на экологическое состояние окружающей среды. // Тезисы докладов III конференции молодых ученых Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН «Океанологические исследования». Владивосток: 19-23 мая 2008. С. 66 – 68.

2. Яцук А.В., Гресов А.И. Результаты эколого-газогеохимических исследований полигона ТБО «Горностаевский». // Тезисы докладов IV конференции молодых учёных Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН “Океанологические исследования”. Владивосток: 18-22 мая 2009 г. С. 82 – 83.

3. Обжиров А.И., Гресов А.И., Коровицкая Е.В., Яцук А.В., Шакиров Р.Б. Нетрадиционные источники углеводородов в Приморском крае. // Материалы Международной конференции «Коммерческое использование нетрадиционных ресурсов метана», Москва: 26-28 мая 2009. С. 100-102.

4. Гресов А.И., Яцук А.В., Обжиров А.И. Генезис и эмиссия окиси углерода полигона ТБО «Владивостокский». // Вестник ДВО РАН. Владивосток: Дальнаука. 2009. № 1. С. 50-54. ISSN 0869-7698.

5. Гресов А.И., Обжиров А.И., Яцук А.В. К вопросу водородоносности угольных бассейнов Дальнего Востока // Вестник Краунц. Науки о Земле. 2010 № 1. С. 231-244.

6. Яцук А.В. Эмиссия газов полигона твёрдых бытовых отходов города Владивостока как источник вредных и токсичных газовойбросов в воздушную среду. // Материалы VII Всероссийского симпозиума «Контроль окружающей среды и климата: КОСК-2010», ИМКЭС СО РАН. Томск, 5-7 июля 2010 г. С. 331-332.

7. Яцук А.В. Утилизация газовой эмиссии полигона твёрдых бытовых отходов Владивостокского городского округа. // Материалы III Региональной конференции молодых учёных «Современные проблемы геологии, геохимии и экологии Дальнего Востока России», ДВГИ ДВО РАН. Владивосток: 28 августа-4 сентября 2010. С. 52-54.

8. Яцук А.В. Мониторинг загрязнения акватории Уссурийского залива в зоне влияния полигона твёрдых бытовых отходов г. Владивостока. // Материалы Всероссийской научной молодежной конференции-школы «Проблемы экологии морского шельфа», ДВГУ. Владивосток: 16-21 сентября 2010. С. 201-203.

9. Яцук А.В. Утилизация газовой эмиссии полигона твёрдых бытовых отходов города Владивостока с целью уменьшения вредных и токсичных газовойбросов в воздушную среду. // Материалы XXI молодежной конференции посвящённой памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца «Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии», ИГГД РАН. Санкт-Петербург: 18-21 октября 2010. С. 50-52.

10. Яцук А.В. Газогеохимические показатели водорастворённых газов акватории Уссурийского залива в зоне влияния полигона твёрдых бытовых отходов г. Владивостока. // Тезисы докладов V конференции молодых учёных Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН «Океанологические исследования». Владивосток: 25-29 апреля 2011 г. С. 128 – 130.