

На правах рукописи



Филаретова Алла Николаевна

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ
ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА
НА КОМПОНЕНТЫ ЮЖНО-ТАЕЖНЫХ ЭКОСИСТЕМ**

25.00.36 – геоэкология
(Науки о Земле)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: кандидат биологических наук, доцент
Кречетов Павел Петрович

Официальные оппоненты: доктор биологических наук, профессор,
Снакин Валерий Викторович,
Институт фундаментальных проблем
биологии РАН,
руководитель отдела экологии,
заведующий лабораторией ландшафтной
экологии

кандидат географических наук,
Гуров Анатолий Федорович,
Государственный университет по
землеустройству,
доцент

Ведущая организация: Институт водных и экологических
проблем СО РАН

Защита состоится «___» мая 2013 года в _____ на заседании диссертационного совета Д 501.001.13 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, главное здание, географический факультет, 18-й этаж, аудитория 1807

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова по адресу: Ломоносовский проспект, д.27, А8. Автореферат размещен на сайте Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (<http://www.geogr.msu.ru/>), а также на официальном сайте ВАК (<http://www.vak.ed.gov.ru>).

Автореферат разослан «___» апреля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Горбунова И.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время твердое топливо применяется для широкого спектра ракетных двигателей. По истечении срока служебной пригодности или вследствие разоружения проводится ликвидация ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ, твердотопливных ракет). В России в качестве основного метода утилизации РДТТ рассматривается бесопловое сжигание (прожиг), которое проводится на производственных комплексах, расположенных в г. Бийск (ОАО «ФНПЦ «Алтай»), г. Пермь (ОАО «НИИПМ») и г. Красноармейск (ФКП «НИИ «Геодезия»). Горение топлива сопровождается сложными и многочисленными химическими реакциями с образованием газообразных и мелкодисперсных твердых веществ. Основную массу продуктов сгорания составляют соляная (хлористоводородная) кислота и окись алюминия. Соляная кислота, поступая в почву, повышает ее кислотность, что вызывает ряд изменений как химических свойств самих почв, так и состояния растительности. Кроме того, есть сведения о неполном сгорании перхлората аммония – вещества второго класса опасности (Справочник..., 1999), приводящем к его поступлению в природные ландшафты (Экологические проблемы..., 2000).

Исследования проблемы утилизации РДТТ носят разнонаправленный характер. Основная масса работ посвящена особенностям горения различных топлив и разработке безопасных способов утилизации зарядов (Высокоэнергетические материалы..., 2005, 2007, 2008, 2010, 2012). Оценка экологических последствий сжигания РДТТ сводится, преимущественно, к мониторинговым исследованиям состояния экосистем территорий, прилегающих к стендам (Кречетов и др., 2008, Пузанов и др., 2008, Батракова и др., 2008). Отдельный блок работ направлен на моделирование формирования и рассеивания облака продуктов сгорания (Ворожцов и др., 2005, Суслонов и др., 2005, Технические..., 2009). В то же время, широко распространены работы по исследованию техногенного воздействия кислотных осадков на компоненты экосистем (Заиков и др., 1991, Почвенно-экологический..., 1994, Копчик и др., 1998, Кислотные..., 1999, Взаимодействие..., 2001, Ливанцова, 2006 и многие др.).

В связи с этим, представляется необходимой комплексная оценка степени техногенного воздействия продуктов сжигания твердого ракетного топлива, которая, основываясь на анализе устойчивости экосистем, позволила бы определить уровень допустимой нагрузки в зонах влияния станций по утилизации РДТТ.

Целью работы является определение степени техногенного воздействия и оценка уровня допустимой антропогенной нагрузки на южно-таежные экосистемы при утилизации твердотопливных ракет.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- оценить степень загрязнения компонентов экосистем в результате утилизации твердотопливных ракет с учетом исходной дифференциации природных условий;
- определить уровень допустимого воздействия загрязняющих веществ на экосистемы, используя концепцию критических нагрузок и экспериментальное лабораторное моделирование;
- оценить вероятность атмосферных выпадений продуктов сгорания методами математического моделирования;
- выявить экосистемы, наиболее подверженные риску загрязнения продуктами сгорания твердого топлива, исходя из природно-климатических особенностей территории.

Материалы и методы исследований. Объектом диссертационных исследований являются экосистемы в зоне влияния предприятия по утилизации РДТТ, находящегося в Пушкинском районе Московской области вблизи города Красноармейск (на территории ФКП НИИ «Геодезия»). В работе применен комплекс методов, включающий полевые исследования, химический анализ, статистическую обработку данных, экспериментальное лабораторное и математическое моделирование, применение ГИС-технологии. Автор принимал непосредственное участие во всех этапах проведения исследований. Полевые исследования проведены в период 2007 – 2010 гг. Было отобрано 20 проб атмосферного воздуха, 40 проб снежного покрова, 29 проб поверхностных вод и

524 пробы почв (поверхностные и по генетическим горизонтам). Проведено 28 описаний почвенно-растительного покрова, выполнено 16 укусов надземной фитомассы. Химико-аналитические работы проведены на географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова и в Центре гигиены и эпидемиологии №154 Федерального медико-биологического агентства (ФМБА). Методами математической статистики проведен анализ результатов мониторинговых наблюдений. Выполнены расчеты критических кислотных нагрузок на южно-таежные экосистемы, верифицированные в ходе лабораторного эксперимента. Количественные параметры возможного воздействия получены с помощью математического моделирования процесса перемещения облака продуктов сгорания и выпадения их на поверхность почв в конкретных условиях. Для визуализации результатов построена серия карт.

Научная новизна. В работе даны предложения по решению актуальной задачи в области геоэкологии – обеспечению экологической безопасности хозяйственной деятельности человека на основе моделирования геоэкологических процессов. Представлена комплексная оценка воздействия утилизации РДТТ на экосистемы в зоне влияния предприятия по утилизации. На основе данных полевых и лабораторных исследований доказана вероятность трансформации химических свойств почв в результате импактного воздействия продуктов сгорания твердого топлива. По разработанной автором математической модели рассчитаны возможные количества и условия выпадений соляной кислоты в процессе перемещения облака продуктов сгорания. Выявлены районы, наиболее подверженные риску загрязнения в результате утилизации РДТТ.

Практическая значимость. На основе модельных данных рассчитано количество прожигов РДТТ, которое не приведет к изменениям в строении и функционировании экосистем на границе санитарно-защитной зоны предприятия. Полученные по итогам работы результаты могут быть использованы при составлении планов-графиков утилизации РДТТ с учетом погодных условий и характера экосистем в зонах наибольшего риска техногенного загрязнения. Материалы работы включены в научно-технические отчеты «Исследование экологических последствий ликвидации зарядов РДТТ методом сжигания в 2010

году в ФКП НИИ «Геодезия» (по договору №18/410-СВ29/08 с ЗАО «Промтекон», 2010) и «Разработка научно-методических основ оценки эколого-геохимической устойчивости ландшафтов к техногенному воздействию» (по соглашению с Минобрнауки №8673, 2012).

Защищаемые положения:

1. Загрязнение ландшафтов в зоне техногенного воздействия предприятия по утилизации твердотопливных ракет носит точечный характер и возможно в пределах 30-километровой зоны. Наиболее подверженными воздействию продуктов сгорания являются экосистемы, расположенные на расстоянии до 10 км к северу и северо-западу от источника воздействия.

2. Степень воздействия продуктов сгорания твердого ракетного топлива на южно-таежные экосистемы зависит от локализации выпадений загрязняющих веществ, которая определяется погодными условиями на момент утилизации ракетных двигателей. Негативное воздействие продуктов сгорания за пределами санитарно-защитной зоны возможно при импактных выпадениях хлористого водорода, которые обусловлены попаданием облака продуктов сгорания в зону дождевых осадков.

3. Южно-таежные экосистемы обладают высокой способностью к самоочищению от продуктов сгорания твердого топлива. Наиболее чувствительными к кислотным выпадениям являются сосняки на подзолах, а наименее – агроценозы на дерново-подзолистых освоенных почвах. За пределами санитарно-защитной зоны импактное воздействие продуктов сгорания не приводит к устойчивому изменению состава и свойств компонентов экосистем.

Апробация работы. Основные положения работы обсуждались на: Всероссийской научной конференции XIV Докучаевские молодежные чтения «Почвы в условиях природных и антропогенных стрессов» (Санкт-Петербург, 2011), Международной научно-практической конференции «Обеспечение экологической безопасности ракетно-космической деятельности» (Москва, 2011), Всероссийской научной конференции «Геохимия ландшафтов и география почв (к 100-летию М.А. Глазовской)» (Москва, 2012).

Публикации. По теме диссертации опубликовано шесть работ, из которых три – статьи в журналах, включенных в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и шести приложений. Работа изложена на 170 страницах, иллюстрирована 48 рисунками и 32 таблицами. Список литературы включает 162 отечественные и 103 зарубежные работы, а также 9 интернет-источников.

Благодарности. Выражаю глубокую признательность за помощь в работе над диссертацией научному руководителю к.б.н., доценту П.П. Кречетову, сотрудникам кафедры геохимии ландшафтов и географии почв Т.В. Королевой, О.В. Черницовой, Т.М. Диановой, А.В. Шарাপовой. Также благодарна д.т.н. Ю.И. Галушкину за помощь, оказанную при математическом моделировании, и к.т.н. А.В. Тарабаре за помощь в организации полевых исследований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Воздействие продуктов сгорания твердого топлива на экосистемы

Современные твердые топлива (ТТ) относятся преимущественно к типу смесевых, компонентами которых являются полимерное горючее-связующее, кристаллический окислитель (в основном соли хлорной кислоты) и металлическая добавка (преимущественно алюминий) (Ерохин и др., 2001). Ликвидация РДТТ на полигоне ФКП НИИ «Геодезия» производится с использованием открытых стендов (без улавливания продуктов сгорания). Среди продуктов сгорания выпадение на земную поверхность в заметных количествах возможно для HCl и оксида алюминия. Оксид алюминия выпадает преимущественно внутри стенда или в его непосредственной близости. Поэтому наибольшую опасность представляет HCl, переход которого в жидкую фазу может привести к выпадению кислых осадков. При нештатной ситуации возможно поступление в окружающую среду исходных компонентов, в том числе перхлората аммония (Экологические проблемы..., 2000).

Почвенный покров, являясь депонирующей средой, предохраняет сопредельные среды от техногенного воздействия, во многом определяя устойчивость экосистем к подкислению (Заиков и др., 1991, Почвенно-экологический..., 1994; Глазовская, 1999). Кислотные осадки с одинаковыми значениями рН вызывают различные ответные реакции в зависимости от степени восприимчивости почв (Копчик и др., 1998, Взаимодействие..., 2001). Важной теоретической базой для определения допустимого действия загрязняющих веществ на экосистемы широко признана концепция критических нагрузок, основанная на предположении о некоторой величине – пороге поступления загрязнителя, превышение которого приведет к необратимым изменениям в структуре функционирования экосистемы (Башкин, 2005).

К возможным изменениям свойств почв при воздействии кислотных осадков относятся снижение рН, повышение обменной кислотности и доли алюминия в ней, выщелачивание обменных катионов, повышение подвижности гумусовых кислот, снижение скорости деструкции органических остатков, аккумуляция подвижных форм соединений металлов, изменение биохимического цикла азота и структуры микробиологических сообществ (Кислотные..., 1999). Главным отрицательным последствием подкисления почв для растительности является возникновение дисбаланса минерального питания. Функциональные нарушения затрагивают также системный и видовой уровень организации растительных сообществ (Ливанцова, 2006).

Перхлораты слабо сорбируются осадочными породами и почвами и хорошо растворимы в природных водах, накапливаются в растительности (Perchlorate..., 2006). В природе они встречаются в составе нитратных месторождений, используемых как минеральные удобрения. Перхлорат-ионы являются антагонистами ионов йода и могут вызывать изменения метаболической активности, затрагивая многие системы организма (Toxicological profile..., 2008). Поэтому содержание перхлоратов контролируется при проведении экологического мониторинга.

Глава 2. Объекты и методы исследований

Изучаемая территория находится в центральной части Русской платформы и имеет полого-холмистый рельеф с широко развитой овражно-балочной сетью. Климат характеризуется теплым летом, умеренно-холодной зимой с устойчивым снежным покровом, преобладанием ветров западной составляющей и южных ветров. Зональные широколиственно-еловые леса европейского типа сочетаются с сенокосами, вторичными березово-осиновыми лесами, а также лугами. Значительные площади земель освоены в сельском хозяйстве. Основу почвенного покрова составляют дерново-подзолистые почвы разной степени оглеенности и окультуренности и подзолы, формирующиеся на покровных суглинках, морене или флювиогляциале московского возраста.

Поскольку перемещение загрязнителей идет атмосферным путем, климатический фактор является определяющим в распространении загрязняющих веществ. Поэтому вне границ санитарно-защитной зоны (СЗЗ) предприятия в соответствии с розой ветров на различном удалении от источника воздействия (5-10км) были определены мониторинговые точки для оценки состояния загрязнения атмосферного воздуха, снежного покрова, природных вод, почв и описания состояния растительных сообществ. Исследования проводились 5 раз в период 2008-2010гг. Отбор и химический анализ проб атмосферного воздуха и природных вод производился сотрудниками ФМБА. Прочие полевые работы выполнены сотрудниками географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, включая автора. Выбор показателей антропогенного воздействия на компоненты экосистем проведен исходя из состава продуктов сгорания ТТ.

Для изучения основных типов почв и оценки степени загрязнения почвенного покрова в районе исследований были заложены опорные почвенные разрезы в автономных и подчиненных позициях. Отбор производился с глубины 0-5 см и 5-20 см методом конверта при поверхностном опробовании и до глубины 100 см с шагом 10см в разрезах. Для выявления сезонной и годовой динамики показателей, а также их отличий в почвах разных относительно полигона направлений, была проведена статистическая обработка данных по критерию Стьюдента.

При описании состояния растительного покрова учитывались изменение видового состава, ухудшение ассоциированности и возрастного спектра ценопопуляций доминантов, выполнены укосы надземной фитомассы.

Прогноз изменения состояния экосистем произведен на основе сравнения критических кислотных нагрузок на экосистемы и потенциально возможных кислотных выпадений. Оценка критических кислотных нагрузок дана на основе балансовой модели. Расчеты количества возможных выпадений соляной кислоты из облака продуктов сгорания проведены с использованием специально разработанной автором математической модели рассеивания облака. Моделирование воздействия кислых осадков на химические свойства почв проведено методом почвенных колонок. Изменения химических свойств оценивались по истечении трех дней и трех недель в двукратной повторности. Почвенная колонка делилась на две части по глубине: 0-5 см и 5-10 см, в которых определялись показатели почвенной кислотности, содержание хлоридов и обменных кальция и магния.

Глава 3. Оценка состояния компонентов экосистем в зоне влияния предприятия

Атмосферный воздух по содержанию хлористого водорода, оксида алюминия, оксида азота, хлора и перхлората аммония характеризуется как чистый.

Для снежного покрова характерны значения рН талой воды от 4,3 до 5,4 и минерализация около 10 мг/л. Наличие перхлорат-иона в снежной толще не выявлено, однако хлориды были обнаружены в 2010 году в двух точках северного направления в количестве 13,5 мг/л. Этот факт позволяет предположить вероятность локализованного воздействия продуктов сгорания ТТ.

Открытые водоемы и ручьи по химическому составу воды соответствуют типичным для данной природной зоны – имеют малую минерализацию и близкую к нейтральной реакцию среды. В водах исследуемой территории не наблюдается признаков подкисления, которые могли бы влиять на состояние гидробионтов.

Значения параметров почвенной кислотности лесных почв и почв под сельскохозяйственными угодьями четко дифференцированы, что подтверждается как

результатами поверхностного опробования, так и анализом данных по опорным разрезам. Наблюдается тенденция к межсезонной и межгодовой изменчивости.

pH лесных почв на глубине 0-5 см составляет 4-5 ед., а в сельскохозяйственных почвах значения pH увеличиваются до 5,3-6,7 ед.

Результаты определения обменной кислотности почв исследуемой территории показывают большой разброс ее значений в верхнем органогенном горизонте лесных почв: от 0,06 до 8,33 ммоль(+)/100г на глубине 0-5 см и 0,10-8,91 ммоль(+)/100г на глубине 5-20 см. Почвы залежных земель и пашен по сравнению с лесными имеют более низкие значения обменной кислотности (0,05-0,39 и 0,06-1,61 ммоль(+)/100г на глубинах 0-5 и 5-20 см соответственно). В лесных почвах в формировании обменной кислотности определяющую роль играет алюминий. В пахотных почвах на первые позиции выходит водород.

В целом лесные почвы исследуемой территории характеризуются слабой степенью ненасыщенности ППК. Сельскохозяйственные почвы содержат значительные количества обменных кальция и магния, что на фоне низких показателей обменной кислотности обуславливает высокую степень насыщенности ППК. Соотношение содержания обменных кальция и алюминия в основной массе исследованных почв не опускается ниже критического уровня, равного 1.

Почвы агроценозов также отличаются от лесных почв низкими содержаниями гидролитической кислотности. На глубине 0-5 см гидролитическая кислотность лесных почв составляет 7,5 – 14 ммоль(+)/100г, в то время как под агроценозами значение этого показателя колеблется от 1,74 до 3,62 ммоль(+)/100г. Вариабельность гидролитической кислотности почв под лесными массивами существенно выше, чем в почвах залежей и пашен. Естественные почвы характеризуются быстрым падением гидролитической кислотности с глубиной (в среднем более чем на 1,5 ммоль(+)/100г), а в пахотных почвах снижение гидролитической кислотности редко превышает 0,5 ммоль(+)/100г.

Распределение показателей почвенной кислотности в профилях почв исследуемой территории находится в соответствии с природными условиями и особенностями хозяйственной деятельности. Однако статистическая обработка данных показала более высокую вариабельность кислотных показателей почв северо-

западного направления относительно юго-восточного и наличие точек с признаками подкисления (за пределами 95% доверительного интервала для математического ожидания), распространенных также в основном в северо-западной части (рис. 1). Сравнение этих данных с розой ветров подтверждает вероятность локального воздействия продуктов сгорания.

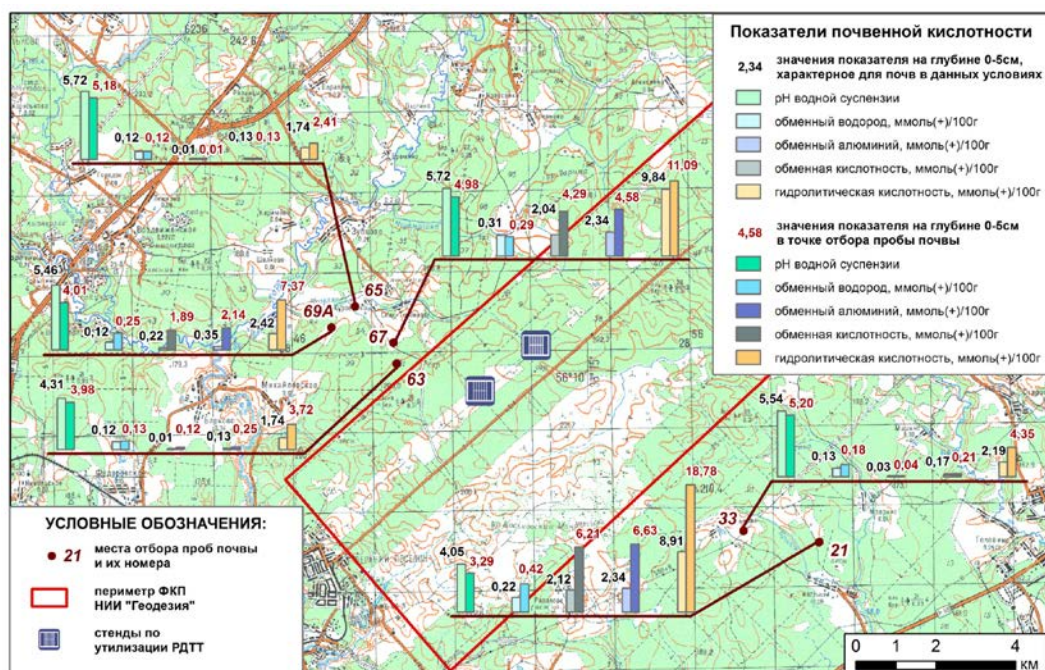


Рис. 1. Расположение точек с признаками подкисления (21, 63 – лес; 33, 65, 67, 69А – поле). Черным шрифтом даны средние значения, красным – фактические значения в точках

Несмотря на наличие в составе выбросов большого количества хлора, его содержание в почвах мониторинговых точек не превышает 0,5 ммоль(+)/100г. Содержание различных форм азота в почвах лесных экосистем находится в пределах значений, характерных для дерново-подзолистого типа почвообразования. Для пахотных почв отмечено пониженное содержание аммония и повышенное – нитритов и нитратов, что связано с особенностями использования.

Наличие перхлорат-иона было определено в разных точках при каждом отборе поверхностных проб почв. Точки обнаружения перхлората приурочены, в основном, к агроценозам. При этом значения содержания варьируют в широких пределах (табл. 1, рис. 2). Необходимо отметить, что точек, в которых перхлорат-ион обнаруживался во все сроки отбора, всего три, и они приурочены к сельскохозяйственным полям и залежным землям. Наличие высоких содержаний перхлорат-

иона в почвах сельскохозяйственных полей может быть обусловлено попаданием перхлоратов в почвы в составе минеральных удобрений.

Таблица 1.

Динамика изменения содержания перхлорат-иона в почвах в 2008-2010 гг.

Год	Диапазон, мг/кг	Встречаемость, % от количества проб
2008, июнь*	0,25-2,3	34
2008, сентябрь*	0,23-0,60	20
2009, июнь*	0,21-1,1	48
2009, сентябрь*	0,23-0,65	31
2010, июнь**	0,1-0,88	80

* - Определение содержания перхлорат-иона проведено по МУК 4.1.016-04, порог определения составляет 0,2 мг/кг. Допустимый уровень содержания в почвах составлял 0,3 мг/кг.

** - С 2010 введен ПДК 0,1 мг/кг.

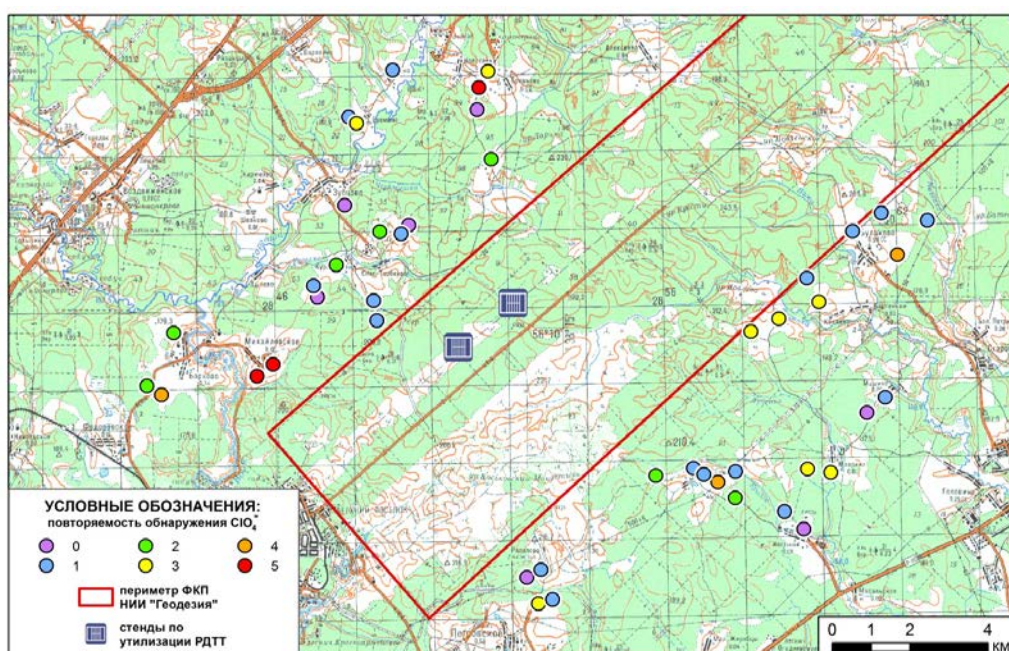


Рис. 2. Точки с регулярным обнаружением перхлорат-иона в поверхностных образцах почв (за 5 сроков отбора)

Растительный покров характеризуется фоновым состоянием при отсутствии видимых нарушений флористического состава, пространственной и горизонтальной структуры и показателей биологической продуктивности.

Глава 4. Прогноз изменения южно-таежных экосистем при утилизации ракетных двигателей

Прогноз потенциального изменения экосистем при прожиге РДТТ основан на оценке соотношения их устойчивости к кислотным выпадениям и возможного количества кислотных выпадений при прожиге РДТТ. Принятая в данных иссле-

дованиях методика направлена на определение потенциального риска загрязнения конкретной территории при плановой ликвидации РДТТ. С этой целью проведен анализ и выбор математических моделей определения критических кислотных нагрузок и рассеивания веществ в атмосфере.

Критические кислотные нагрузки для экосистем исследуемой территории были рассчитаны с помощью балансового метода (Кислотные..., 1999) по литературным данным. В качестве основного критерия при этом подходе является величина кислотонейтрализующей способности почв. На исследуемой территории минимальные критические нагрузки составляют 11 ммоль(+)/м²/год и характерны для сосняков на подзолах, а максимальные – для пахотных почв под агроценозами (145 ммоль(+)/м²/год) (табл. 2).

Таблица 2.

Критические кислотные нагрузки (по соляной кислоте) на экосистемы

Почвы	Критическая нагрузка $\frac{\text{ммоль Н}^+/\text{м}^2/\text{год}}{\text{г НСl}/\text{м}^2/\text{год}}$				Травянистые экосистемы
	Лесные экосистемы				
	с преобладанием сосны	сосново-еловые	с преобладанием ели	с преобладанием березы или осины	
Подзолы	<u>11</u> 0,41	<u>14</u> 0,50	<u>16</u> 0,59	<u>19</u> 0,70	<u>35</u> 1,26
Болотные низинные	<u>18</u> 0,67	<u>21</u> 0,76	<u>23</u> 0,85	<u>26</u> 0,96	<u>42</u> 1,53
Дерново-сильноподзолистые	<u>19</u> 0,68	<u>21</u> 0,78	<u>24</u> 0,87	<u>27</u> 0,98	<u>42</u> 1,54
Дерново-подзолистые смытые	<u>32</u> 1,15	<u>34</u> 1,24	<u>37</u> 1,33	<u>40</u> 1,44	<u>55</u> 2,01
Аллювиальные ненасыщенные, смытые и намывные почвы оврагов и балок	<u>44</u> 1,61	<u>47</u> 1,70	<u>49</u> 1,79	<u>52</u> 1,90	<u>68</u> 2,46
Дерново-слабо- и среднеподзолистые	<u>44</u> 1,62	<u>47</u> 1,71	<u>49</u> 1,80	<u>52</u> 1,91	<u>68</u> 2,47
Дерново-подзолистые глееватые и глеевые	<u>69</u> 2,51	<u>71</u> 2,61	<u>74</u> 2,70	<u>77</u> 2,81	<u>92</u> 3,37
Болотно-подзолистые	<u>94</u> 3,41	<u>96</u> 3,50	<u>99</u> 3,59	<u>102</u> 3,70	<u>117</u> 4,27
Дерново-глеевые	<u>107</u> 3,91	<u>110</u> 4,01	<u>112</u> 4,10	<u>115</u> 4,20	<u>131</u> 4,77
Дерновые остаточные карбонатные	<u>121</u> 4,42	<u>124</u> 4,51	<u>126</u> 4,60	<u>129</u> 4,71	<u>145</u> 5,27
Освоенные почвы					<u>145</u> 5,27

Методом компонентного совмещения природных контуров подготовлена карта критических нагрузок экосистем исследуемой территории. По величине критической нагрузки хлористоводородной кислоты все экосистемы зоны влияния стенов утилизации РДТТ были объединены в 8 групп (рис. 3).

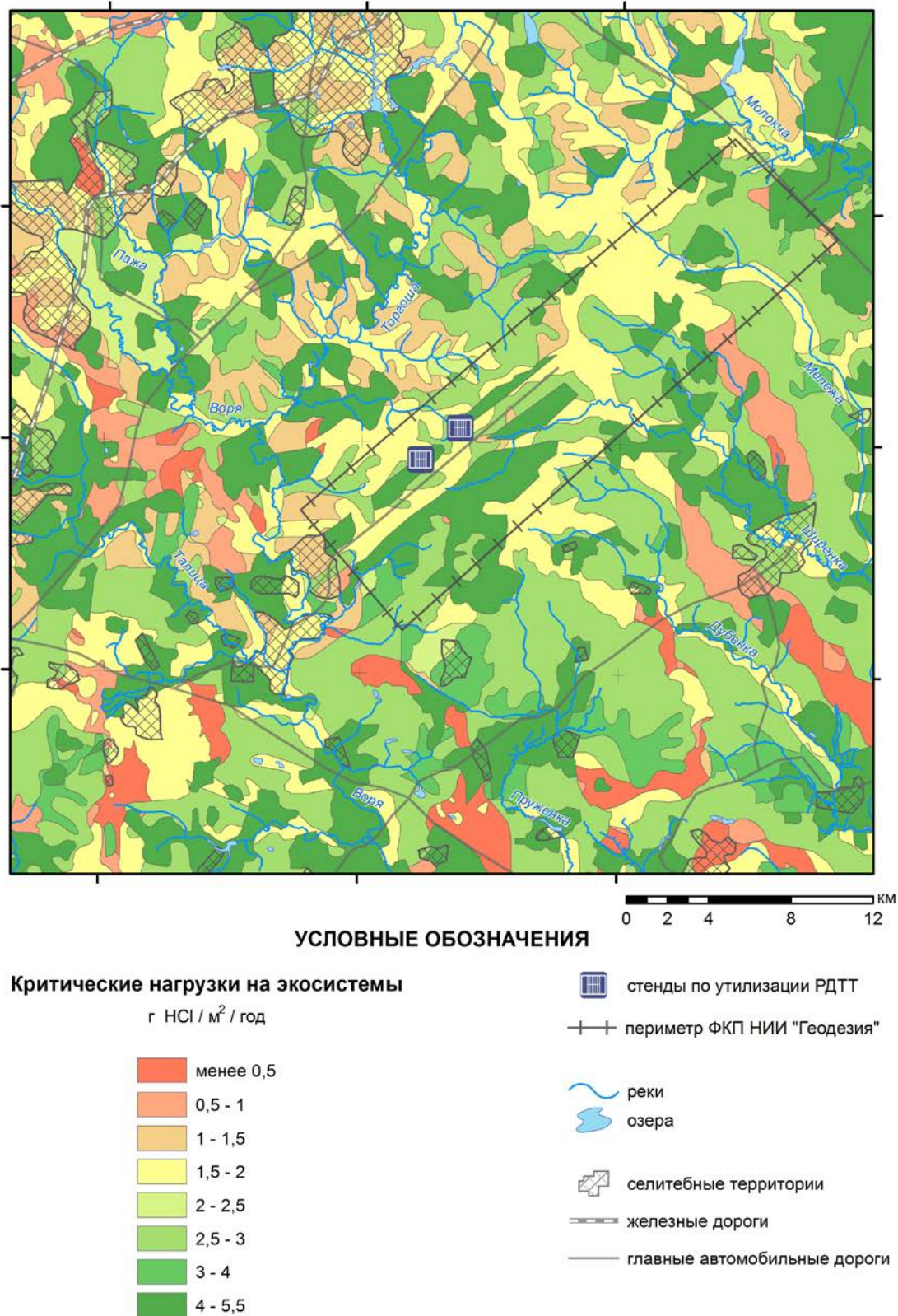


Рис. 3. Критические нагрузки соляной кислоты на экосистемы

Наибольшему экологическому риску подвержены экосистемы с минимальными критическими нагрузками, распространенные примерно на 3,5% исследуемой территории. Из-за высокой эродированности зональные лесные экосистемы на дерново-подзолистых почвах, входящие в группу экосистем с критическими нагрузками от 1,5 до 2 г HCl/m²/год, занимают только пятую часть территории. Наибольшую площадь занимают экосистемы с критическими нагрузками 2,5-3 г HCl/m²/год вследствие широкого распространения дерново-подзолистых оглеенных почв. Из-за значительной освоенности, экосистемы с максимальными критическими нагрузками занимают около четверти площади.

После прожига РДТТ образуется облако продуктов сгорания. Под действием архимедовой силы оно поднимается до высоты стабилизации (1-2 км), а затем перемещается с потоком воздуха. При этом происходит быстрое рассеивание облака, на которое влияют диффузия, осаждение и перенос ветром. В зависимости от погодных условий этот процесс занимает разное количество времени (Суслонов и др., 2005). Через изучение рассеивания облака продуктов сгорания и, соответственно, концентрации кислоты в нем, можно оценить количество соляной кислоты, которое потенциально может выпасть на экосистемы зоны воздействия предприятия. Существующие расчетные методы по определению параметров загрязнения атмосферным путем базируются на рассмотрении диффузии облака применительно к условиям турбулизации потока в атмосфере. В дневное время, когда проводится утилизация РДТТ, наблюдается четыре класса устойчивости атмосферы: А – сильнонеустойчивая стратификация атмосферы, В – среднеустойчивая, С – умеренно неустойчивая и D - нейтральная. С целью упрощения дальнейшей обработки метеорологических данных классы С и D были объединены (табл. 3).

Таблица 3.

Модифицированные классы устойчивости по Паскуилу (по РД-03-26-2007)

Скорость ветра, м/с	Облачность (баллы)			
	Меньше 5	5-7	Больше 7	Сплошная
<2	A	A	B	C
2-3	A	B	C	C
3-5	B	C	C	C

Направление и скорость ветра оказывают решающее влияние на формирование области загрязнения веществами, перемещающимися с атмосферными пото-

ками. Проведенная нами оценка направлений ветра в течение года в районе предприятия показывает, что наиболее подверженными воздействию кислотных выпадений являются территории, расположенные к северу от полигона (табл. 4).

Таблица 4.

Относительная повторяемость классов устойчивости атмосферы по направлениям ветра в годовом разрезе (%) (по данным метеостанции ВВЦ, г. Москва, www.meteo.infospace.ru)

	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
А	5,18	6,82	7,20	4,50	5,46	2,64	2,41	3,54
В	5,46	4,86	2,81	2,42	3,53	1,76	3,45	4,88
С	4,86	2,84	4,39	3,22	4,53	3,94	2,76	6,55

Особенности воздействия утилизации РДТТ (моментальность, большое количество веществ, высокая температура, эпизодичность) обуславливают невозможность применения большинства методик расчета рассеивания веществ в атмосфере. Поэтому существуют специальные модели, описывающие процесс образования и рассеивания облака продуктов сгорания (Технические..., 2009), которые, однако, не учитывают вероятность осаждения загрязнителей с каплями дождя и тумана. Помимо этих моделей в работе учитывались также данные и модели, приведенные в Методических указаниях по оценке последствий аварийных выбросов опасных веществ (РД 03-26-2007) и ряде других источников. Особенностью предлагаемой модели является ее узкая направленность – специфика источника воздействия, территориальная локальность, анализ выпадения HCl. Достоинством получаемых результатов служит их подробность, достигаемая путем значительной дискретности по расстоянию от источника.

Процесс подъема облака продуктов сгорания сопровождается изменением температуры и объема самого облака, а также изменением температуры воздуха и атмосферного давления, и приводит к фазовым переходам водяного пара и HCl. Если образующееся при этом количество жидкости (воды и соляной кислоты) превышает максимальную абсолютную влажность воздуха, то происходит гравитационное (термодинамически обусловленное) выпадение продуктов сгорания на поверхность (рис. 4). Увеличение размеров облака может достичь такой степени, что вертикальный радиус начнет превышать высоту перемещения. При наличии в облаке соляной кислоты в жидком состоянии, она оседает на поверхности, что также

учитывается в разработанной модели. В условиях выпадения осадков возможна адсорбция хлористого водорода в каплях дождя, приводящая к выпадению соляной кислоты на поверхность. Количество кислоты, поступившей на поверхность тем или иным способом, суммировалось с учетом перекрытия объемов облака при дискретном расчете.

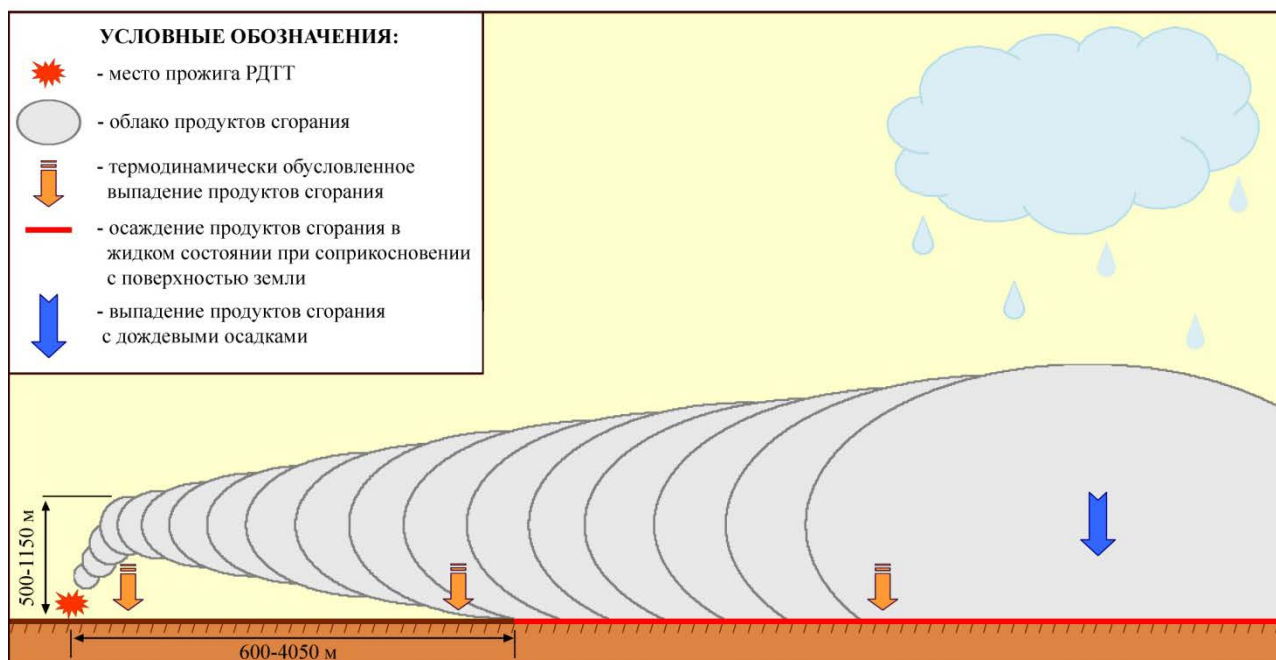


Рис. 4. Схема рассеивания облака продуктов сгорания и выпадения HCl на поверхность почвы

На плотность облака продуктов сгорания помимо класса устойчивости атмосферы (А, В, С) большое влияние оказывает температура воздуха, поэтому расчет был произведен для пяти температур воздуха (-30, -15, 0, +15, +30°C), что позволило охватить средний многолетний минимум и максимум температур для данной местности. Концентрация кислоты в облаке также сильно зависит от скорости ветра и влажности воздуха. Вследствие этого расчеты выполнены для шести скоростей ветра (0, 1, 2, 3, 4 и 5 м/с) и четырех значений влажности воздуха (25, 50, 75 и 100%). Расчеты проведены для РДТТ с массой горючего 18,8, 7,6 и 5т.

Анализ результатов расчетов по модели показал, что термодинамически обусловленное выпадение хлористоводородной кислоты происходит только при температурах воздуха ниже +4°C. При этом, в условиях высокой влажности воздуха выпадения происходят вблизи стенов по утилизации, в основном, вследствие конденсации при подъеме облака, а в условиях низкой влажности воздуха –

при соприкосновении капель соляной кислоты с поверхностью в результате рассеивания облака. Повышение температуры воздуха способствует снижению скорости конденсации влаги, вследствие чего при влажности воздуха 50-75% наблюдается смена процессов осаждения кислоты: при низких температурах преобладающим процессом является конденсация влаги, сменяющаяся при повышении температуры осаждением при соприкосновении с поверхностью почвы. При температурах воздуха выше $+4^{\circ}\text{C}$ выпадение соляной кислоты на поверхность почвы может происходить только с осадками.

Оценка потенциально возможного количества кислоты, выпадающего на поверхность в результате термодинамических процессов, производилась с учетом повторяемости погодных условий по разным направлениям относительно стендов утилизации РДТТ из расчета, что каждый день производится прожиг ракеты с массой горючего 18,8 т. По полученным данным построена карта выпадений соляной кислоты в зимний период. Сравнение ее с картой критических нагрузок показывает, что основное воздействие происходит в радиусе менее 1 км от стендов.

Расчет выпадений соляной кислоты по погодным условиям в 2008 году показал отсутствие значимых выпадений на расстоянии больше 1 км от стендов сжигания. Это позволяет сделать вывод, что обнаруженное статистически подкисление почв возможно лишь при импактном воздействии. Например, при попадании облака продуктов сгорания в зону дождя уже на удалении от стендов.

Средние выпадения кислоты на границе ФКП НИИ «Геодезия» для РДТТ с массой газо-воздушной смеси 18,8 т соответствуют следующим условиям: класс устойчивости атмосферы С, скорость ветра 1 м/с, температура воздуха 15°C (влажность воздуха не влияет на изменение размеров облака продуктов сгорания, а соответственно и на величины импактных выпадений). Полученные данные показывают, что в таких условиях подкисление почв за пределами санитарно-защитной зоны возможно даже при одном прожиге РДТТ (рис. 5) и возможны в радиусе 30 км от предприятия. Наиболее подверженными являются территории, лежащие к северу и северо-западу на расстоянии до 10 км.

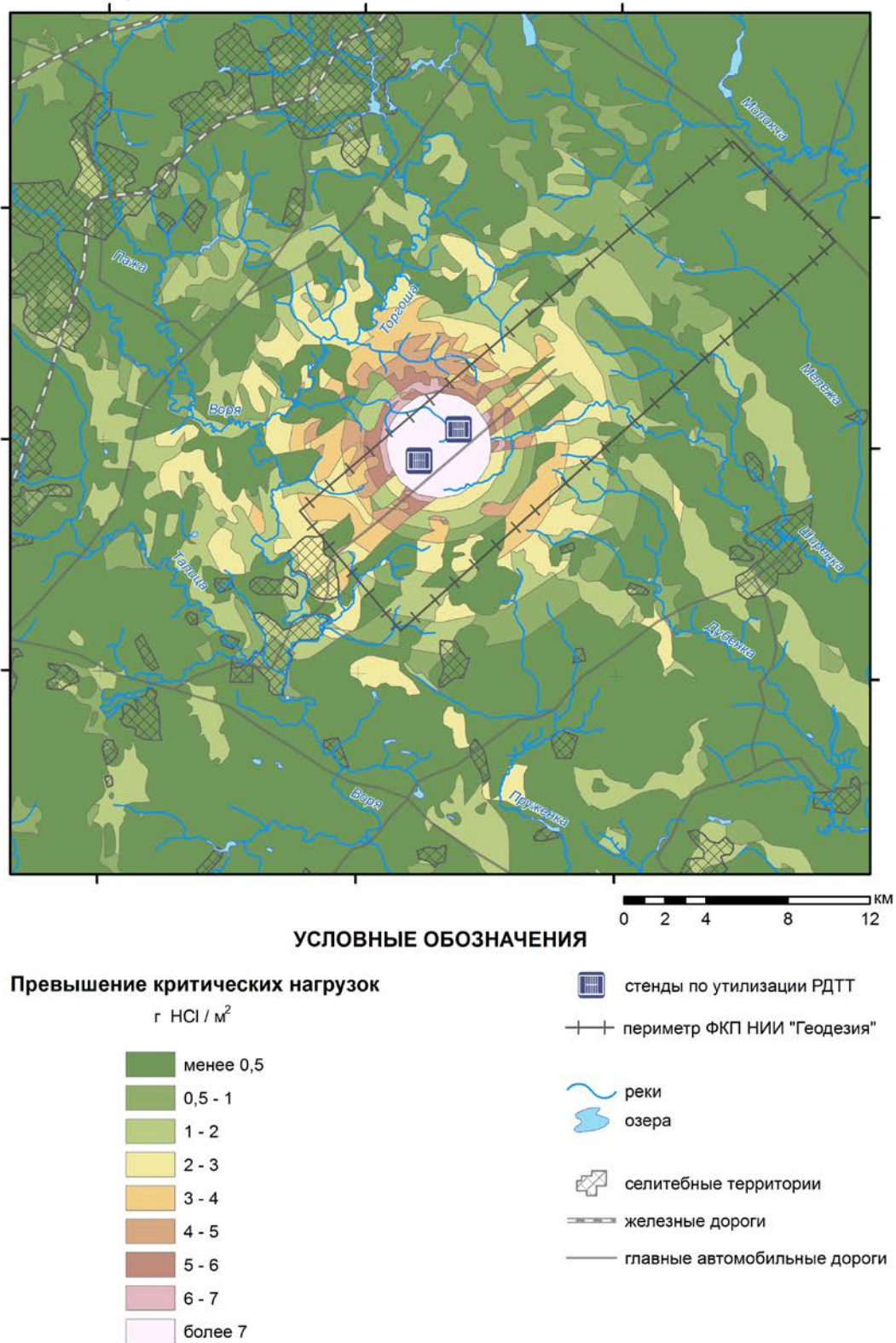


Рис. 5. Карта превышения критических кислотных нагрузок на экосистемы при импактном выпадении соляной кислоты

Для расчета количества прожигов, которое не повлечет за собой значимых изменений в строении и функционировании экосистем на границе ФКП НИИ «Геодезия» использованы данные о выпадениях, при которых не будут превышены критические нагрузки для самых неустойчивых экосистем в конкретном на-

правлении относительно источника воздействия (табл. 5). За количество HCl, выпадающее на поверхность, принято среднее по трем вариантам массы горючего РДТТ, соответствующее максимально возможным выпадениям в данных условиях. Также учтена повторяемость классов устойчивости атмосферы при разных направлениях ветра.

Таблица 5.

Возможное количество прожигов РДТТ в условиях попадания облака продуктов сгорания в зону дождя на границе ФКП НИИ «Геодезия»

Показатель	Направление ветра								
		С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Допустимое количество прожигов для экосистем с минимальными критическими нагрузками по классам устойчивости атмосферы	А	7	1	2	1	1	13	3	4
	В	3	1	1	1	1	5	1	2
	С	1	0	0	0	0	1	0	1
Доля дней в году с данным классом устойчивости атмосферы при данном ветре	А	0,40	0,32	0,28	0,24	0,33	0,47	0,50	0,44
	В	0,26	0,21	0,40	0,33	0,35	0,33	0,20	0,24
	С	0,34	0,47	0,32	0,44	0,31	0,20	0,30	0,32
Допустимое количество прожигов с учетом повторяемости классов устойчивости атмосферы	А	2	1	1	0	0	4	1	1
	В	1	0	0	0	0	1	1	1
	С	0	0	0	0	0	1	0	0
Возможное количество прожигов за год без ущерба для экосистем на границе ФКП НИИ «Геодезия»		3	1	1	0	0	6	2	2

Как видно из таблицы 5, самыми благоприятными с экологической точки зрения являются ветра юго-западного румба, дующие в направлении полигона. Наиболее опасными являются ветра южного и юго-восточного направлений. При этих ветрах рекомендуется в теплое время года во время локальных осадков вообще не проводить утилизацию. Необходимо отметить, что в условиях переменной облачности или сильного ветра (класс устойчивости атмосферы С) утилизация РДТТ может причинить ущерб экосистемам на границе СЗЗ предприятия при любом направлении ветра, кроме ЮЗ.

Таким образом, наиболее подверженными риску загрязнения продуктами сгорания ТТ на границе ФКП НИИ «Геодезия» являются экосистемы, находящиеся к северу и северо-западу от стендов сжигания.

С целью изучения влияния потенциально возможного количества кислых осадков на химические свойства почв исследуемой территории был проведен модельный лабораторный эксперимент. Для эксперимента использованы гумусовые горизонты почв с различной буферной способностью: дерново-подзолистых, под-

золов, дерново-подзолистых освоенных средне- и тяжелосуглинистых. Концентрации растворов HCl рассчитывались в соответствии с критическими кислотными нагрузками наиболее подверженных подкислению экосистем (подзолов под сенокосами) – 0,5 г HCl/ м² и для наиболее распространенных экосистем изучаемой территории (дерново-подзолистых глееватых почв под смешанными лесами) – 3 г HCl/ м². Кроме того, в эксперименте изучалось воздействие максимально возможного разового выпадения кислоты на границе СЗЗ предприятия – 7,5 г HCl/ м². Контроль изменений производился по колонкам, залитым таким же объемом дистиллированной воды.

Анализ полученных данных показывает, что основные изменения химических свойств почв происходят в верхних 5 см, в нижней части колонки изменения часто не так выражены. Значимость снижения рН во всех исследованных почвах возрастает при повышении кислотности воздействующих растворов, при этом возможны смены буферных кислотно-основных зон. Снижение рН в пахотных горизонтах происходит сильнее, чем в естественных, и составляет в верхней части при максимальной нагрузке 1-1,5 против 0,5-1 (рис. 7).

Подкисление почв под воздействием вносимых растворов проявляется также и в повышении обменной кислотности. Обменная кислотность пахотных почв существенно ниже обменной кислотности природных аналогов, поэтому ее изменения незначительны и не превышают 0,5 ммоль(+)/100г, в то время как в природных почвах при максимальных нагрузках они могут достигать по алюминию 3 и более ммоль(+)/100г. Гидролитическая кислотность также имеет тенденцию к увеличению при повышении нагрузки.

Содержание обменных катионов менее подвержено изменениям, которые в основном касаются магния, что объясняется меньшей силой его удерживания почвами. В динамике соотношения обменных кальция и алюминия наблюдается снижение данного показателя при усилении нагрузки в лесных почвах и некоторое его увеличение в освоенных почвах. В содержании хлоридов прослеживается четкое увеличение значений при повышении нагрузки, проявляющееся в верхней части почвенной колонки намного интенсивнее, чем в нижней.

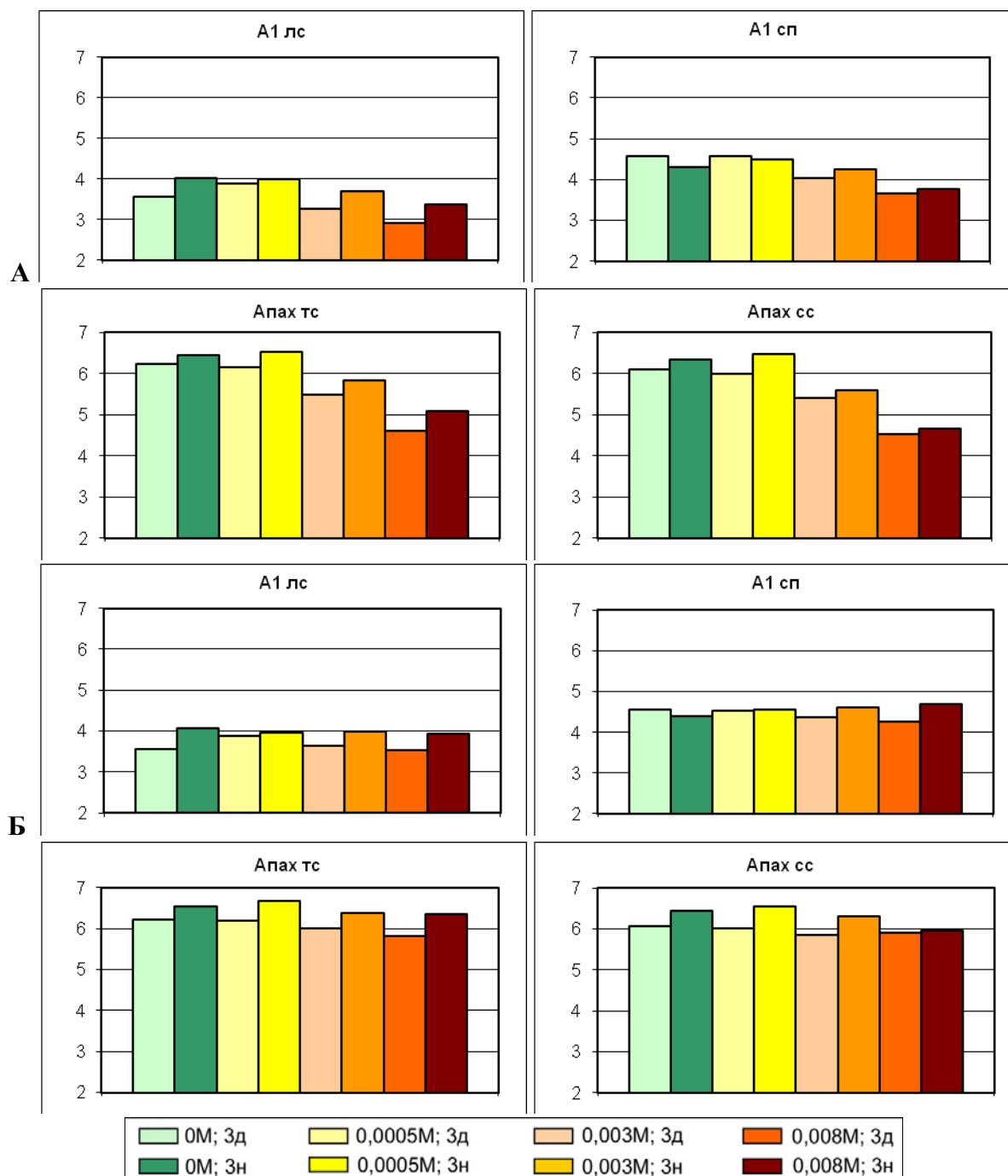


Рис. 7. Изменения pH гумусовых горизонтов почв при внесении кислых растворов разной концентрации в верхней (А) и нижней (Б) частях колонок. 3д – трехдневный срок измерений, 3н – трехнедельный. Гумусовые горизонты: А1 лс – дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, А1 сп – подзола супесчаного, Апах сс и Апах тс – дерново-подзолистых освоенных средне- и тяжелосуглинистых

Следует отметить, что во всех вариантах эксперимента через трое суток почвы по всем показателям являются более кислыми, чем через три недели, и одновременно содержат меньше обменных кальция и магния. Этот факт может свидетельствовать о способности почв к самовосстановлению после воздействия кислотных осадков. Таким образом, результаты моделирования показывают, что воздействие продуктов сгорания ТТ может приводить к локальному подкислению

почв, выявленному в ходе мониторинговых исследований зоны воздействия предприятия по утилизации РДТТ.

Выводы

1. Основная масса газообразных продуктов сгорания представлена хлористым водородом (до 40%), что может приводить к возникновению кислотных осадков, негативно влияющих на компоненты экосистем. Статистический анализ показателей почвенной кислотности в зоне влияния стенов по утилизации РДТТ выявил участки подкисления почв: снижение значения рН в среднем на 1 – 1,5 единицы и увеличение обменной и гидролитической кислотности в 1,5 – 2 раза. Обследование территории показало, что загрязнение токсичным перхлоратом в концентрациях, превышающих ПДК, приурочено к почвам агроценозов и может быть обусловлено внесением минеральных удобрений. Загрязнение атмосферного воздуха, поверхностных водоемов и повреждения растительности не установлено.
2. Критические кислотные нагрузки на экосистемы варьируют от 11 до 145 ммоль(+)/м²/год. Минимальные критические нагрузки характерны для сосняков на подзолах (занимают около 3% территории), а максимальные – для агроценозов (до 20% площади). Наибольшую площадь (около 30% – 345 км²) занимают лесные экосистемы с критическими нагрузками 69-77 ммоль(+)/м²/год, что соответствует 2,5-3 г HCl/м²/год.
3. Результаты математического моделирования показали, что степень техногенной нагрузки в зоне влияния предприятия по утилизации РДТТ определяется погодными условиями на момент прожига. Термодинамически обусловленные выпадения хлористоводородной кислоты возможны только при температурах +4°С и ниже. Максимальное количество кислоты выпадает в радиусе 600-800 м от стенов. За пределами СЗЗ предприятия выпадения не превышают критических нагрузок на экосистемы. В теплый период года выпадение кислоты возможно только с атмосферными осадками. Подкисление почв вне санитарно-защитной зоны предприятия по утилизации РДТТ возможно при импактном воздействии – при выпадении кислоты с дождевыми осадками. Наиболее под-

верженными риску загрязнения продуктами сгорания твердого ракетного топлива на границе ФКП НИИ «Геодезия» являются экосистемы, находящиеся к северу и северо-западу от стендов сжигания. По расчетным данным выпадения хлористого водорода в этих экосистемах за пределами СЗЗ могут превышать величины критических нагрузок в 2-3 раза.

4. Верификация результатов математического моделирования данными лабораторного эксперимента подтвердила наличие достоверных изменений показателей почвенной кислотности при выбранных параметрах модели. Изменения химических свойств почв при воздействии кислотных осадков затрагивают в основном верхние 5 см почвы, ниже степень трансформации существенно снижается. Оценка динамики изменения свойств почв при отсутствии дальнейшей нагрузки выявила снижение кислотности почв и повышение содержания обменных оснований, что свидетельствует об обратимости процессов подкисления в почвах исследованной территории и сохранении благоприятных условий для существования биоты.
5. Комплексное использование ландшафтно-геохимических, геоинформационных и математических методов, а также моделирования процессов миграции и трансформации загрязняющих веществ позволяет определить условия хозяйственной деятельности предприятия, обеспечивающие минимальное негативное воздействие утилизации РДТТ на ландшафты за пределами санитарно-защитной зоны. Полученные данные позволяют оптимизировать систему экологического мониторинга предприятия с учетом ландшафтных особенностей исследуемой территории и погодных условий.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных для опубликования основных результатов диссертаций:

1. **Филаретова А.Н.**, Дианова Т.М., Королева Т.В. Характеристика кислотности почв в зоне влияния предприятия по утилизации твердотопливных ракет // Естественные и технические науки. – 2009. – №6(44). – С.372-375.
2. **Филаретова А.Н.**, Кречетов П.П., Королева Т.В., Дианова Т.М. Оценка буферности почв подзолистого ряда к импактному кислотному воздействию // Мир науки, культуры, образования. – 2012. – №6 (37). – С. 519-522.
3. **Филаретова А.Н.**, Кречетов П.П., Королева Т.В., Дианова Т.М. Устойчивость южно-таежных экосистем северо-восточной части Московской области к воздействию кислотных осадков // Фундаментальные исследования. – 2012. – №11. – Ч.3. – С. 542-547.

Публикации в других изданиях:

4. **Филаретова А.Н.** Оценка возможности подкисления почв при утилизации твердотопливных ракет в южно-таежной зоне // Материалы Всероссийской научной конференции XIV Докучаевские молодежные чтения «Почвы в условиях природных и антропогенных стрессов». – СПб.: Издательский дом С.-Петербургского государственного университета, 2011. – С.181-182.
5. **Филаретова А.Н.** Анализ потенциального экологического риска при прожиге РДТТ в южно-таежной зоне // Обеспечение экологической безопасности ракетно-космической деятельности: Материалы Международной научно-практической конференции, 18 мая 2011 г. – М.: Географический ф-т МГУ, 2011. – С.131-136.
6. **Филаретова А.Н.** Оценка уязвимости экосистем при утилизации твердотопливных ракет // Геохимия ландшафтов и география почв (к 100-летию М.А. Глазовской). Доклады Всероссийской научной конференции. Москва, 4-6 апреля 2012г. – М.: Географ. Факультет МГУ, 2012. – С.335-337.