

На правах рукописи



Филимонова Людмила Михайловна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ
СНЕГОВОГО ПОКРОВА В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО ЗАВОДА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 25.00.36 – Геоэкология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

Кандидат геолого-минералогических наук Бычинский Валерий Алексеевич

Официальные оппоненты:

Доктор географических наук Давыдова Нина Даниловна, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск. Ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии ландшафтов и географии почв.

Кандидат геолого-минералогических наук Анна Валерьевна Таловская, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск. Доцент кафедры геоэкологии и геохимии.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», г. Владивосток. Базовая кафедра химических и ресурсосберегающих технологий Школы естественных наук

Защита состоится 5 октября 2017 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.059.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 664033, Иркутск, ул. Фаворского 1а, факс: (3952)42 70 50

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН и сайте - <http://www.igc.irk.ru/ru/ob-yavleniya> .

Автореферат разослан 10 августа 2017 г.

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



Г.П. Королева

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Крупнейшие предприятия Иркутского промышленного центра – Филиал ОАО «РУСАЛ Братск», топливно-энергетический комплекс (Ново-Иркутская ТЭЦ), стройиндустрия – составляют мощный промышленный узел, выбросы загрязняющих веществ которого оказывают воздействие на окружающую среду. Изучение геоэкологической обстановки, опирающееся на анализ содержания в природных средах широкого круга элементов, позволило определить пространственную структуру распределения токсичных элементов и идентифицировать источники загрязнения. В условиях нарастающего техногенного воздействия геоэкологический контроль за состоянием окружающей среды Иркутско-Шелеховского района приобретает все более актуальное значение.

Проблема влияния алюминиевого производства на окружающую среду рассматривалась достаточно широко. Однако до настоящего времени процессы миграции и концентрации токсичных элементов детально не рассматривались. Имеется качественная оценка состава, но данные о формах существования поллютантов в твердом осадке и снеговой воде ограничены и не позволяют оценить возможные пути их преобразования в почвах и природных водах.

Цель работы – разработка компьютерных средств изучения геоэкологической обстановки крупных промышленных центров, основанных на современных ГИС-технологиях и физико-химических моделях воздействия на окружающую среду газопылевых выбросов.

Основные задачи исследования:

- дать количественное описание распределения химических элементов в снеговом покрове, определить параметры и состав техногенной нагрузки;
- определить геохимические ассоциации элементов, характеризующие различные типы газопылевых выбросов;
- разработать физико-химическую модель преобразования газопылевых выбросов в окружающей среде и определить формы существования элементов-загрязнителей в растворе и твердых фазах;
- на основе полученных данных построить моноэлементные и полиэлементные карты ореолов техногенной нагрузки, поступающей с атмосферными аэрозолями.

Защищаемые положения.

1. Геоинформационная система, основанная на наборе интегральных показателей (суммарный показатель загрязнения Z_C , пылевая нагрузка P , коэффициенты концентрации KK), обеспечивает объективную оценку качества окружающей среды и позволяет отслеживать пространственные границы зон техногенной нагрузки.

2. Методами статистического анализа химико-аналитических данных установлено, что основными маркерами загрязнения окружающей среды алюминиевым производством являются Al, Na, As, Li, Ni, F, Cd, Be. Теплоэнергетический комплекс – источник Si, Fe, Mg, Mn, В. Под воздействием автотранспорта, дорожного и жилищного строительства накапливаются V, Zn, Cd, Pb, Ca, Cr, Mn, Co, Cu, C, S.

3. С помощью физико-химического моделирования установлено, что в зонах с высокой техногенной нагрузкой в снеговой воде накапливаются $SO_4^{2-} \rightarrow Cl^- \rightarrow F^- \rightarrow Ca^{2+} \rightarrow Mg^{2+} \rightarrow Na^+$. Преобладающими формами существования токсичных элементов являются $Be(OH)^+$, NiF^+ , $Ni(OH)^+$, $PbCl^+$, $Pb(OH)^+$, PbF^+ , $Zn(OH)^+$, ZnF^+ , CuF^+ , $Cu(OH)^+$, $CdCl^+$, AlF^{2+} . В твердом осадке накапливаются новообразованные минеральные фазы: гиббсит, каолинит, манганит, флюорапатит. Микроэлементы существуют в форме Zn_2SiO_4 , $Be(OH)_2$, As_2O_5 , $Cu(OH)_2$, CrO_2 , CaF_2 , Ni-амезита, касситерита, стронцианита.

Научная новизна работы.

Определены корреляционные зависимости накопления химических элементов в снеговой воде и твердом осадке снега, поступающих с газопылевыми выбросами, что позволило рассчитать суммарный показатель загрязнения Z_c для Шелеховского промышленного района.

Выявлены ассоциации химических элементов, характерные для производства алюминия и теплоэнергетического комплекса, проявленные в основных компонентах окружающей среды.

Установлены основные минеральные фазы, присутствующие в твердых аэрозолях и оценена их потенциальная растворимость.

С помощью физико-химических моделей установлены основные закономерности миграции токсичных элементов с водными растворами.

Практическая значимость работы. Результаты исследований позволили разработать качественно новый способ выявления техногенных аномалий, которые обычными методами не обнаруживаются. Это позволяет дать точную количественную оценку экологического состояния зоны воздействия алюминиевых производств, определив процессы последующего преобразования газопылевых выбросов. Высокая чувствительность представленного метода позволит своевременно выполнить природоохранные мероприятия. Материалы диссертационной работы используются для создания методических учебных программ и проведения практических работ по курсу «Геоэкология» для студентов ИГУ.

Личный вклад автора. Автор принимала участие в полевых работах с 2011 по 2014 годы, в общей сложности обработано и подготовлено к анализу 174 пробы снежного покрова, проведена химико-аналитическая обработка и теоретическое обобщение полученных данных. Подготовлена база данных для построения картографических моделей. Создана физико-химическая модель преобразования атмосферных аэрозолей, взаимодействующих с природными водами.

Апробация работы и публикации. Основные положения и отдельные результаты исследования докладывались и обсуждались на межрегиональных научно-практических конференциях «Экологические и медицинские проблемы Сибири» (г. Ангарск, 2012 г.), «Актуальные проблемы геологии, планетологии и геоэкологии» (г. Иркутск, 2013 г.), «Малые реки, экология и перспективы развития» (г. Чебоксары, 2012 г.), «Экологическая геология и рациональное недропользование» (г. Санкт-Петербург, 2013 г.). По теме диссертации опубликовано пять статей из перечня ведущих периодических изданий ВАК РФ, две из которых в журналах из перечня WOS.

Фактический материал. При выполнении работы автор использовала данные, полученные Институтом геохимии СО РАН в результате многолетних геоэкологических исследований, проведенных в районе г. Шелехова и г. Иркутска. Работы велись под научным руководством В.И. Гребенщиковой и В.А. Бычинского. В основу работы положены результаты анализов 174 снеговых проб.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 134 страницах машинописного текста, содержит 16 таблиц, 33 рисунка и список литературы, насчитывающий 153 наименования.

Благодарности. Автор выражает благодарность: научному руководителю к.г.-м.н. В.А. Бычинскому за помощь и постоянное внимание к работе; д.г.-м.н. К.В. Чудненко, д.х.н. В.Л. Таусону, д.г.-м.н. В.А. Гребенщиковой, д.х.н. А.А. Тупицыну, к.х.н. А.В. Мухетдиновой за обсуждение работы и ценные советы; к.г.-м.н. А.В. Паршину, к.г.-м.н. А.Е. Будяку, С.Н. Просекину, сотрудникам аналитического отдела ИГХ СО РАН за рекомендации и оказание помощи в полевых работах. Огромная благодарность за консультации при проведении аналитических измерений д.х.н. И.Е. Васильевой, д.ф.-м.н. Е.В. Шабановой, к.г.-м.н. О.В. Зарубиной, к.х.н. О.Ю. Белозеровой.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Методы контроля и оценки техногенной нагрузки на окружающую среду

Главной геофизической обсерваторией им. А.И. Воейкова проводилось широкомасштабное исследование по загрязнению атмосферного воздуха более чем в 250 городах России. Оно показало, что в списке самых грязных городов страны 7-е место принадлежит Братску, 11-е Иркутску, 34-е Шелехову (Ежегодник..., 2011). Это выражается в загрязнении снегового покрова, почв, поверхностных вод, донных отложений F, S, Al, Be, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, As, Zn.

Количество газопылевых выбросов и твердых отходов определяется тем, что на получение одной тонны алюминия расходуется наряду с фтором, поступающим с фтористыми солями, используется 10 кг серы, присутствующей в анодной массе, и 20 кг натрия, привносимого с кальцинированной содой, используемой в системе газоочистки. Таким образом, с 1962 г. на территорию, прилегающую к Шелеховскому промышленному району, с газопылевыми выбросами и твердыми отходами поступило приблизительно 100 тыс. т фтора, 150 тыс. т серы и около 80 тыс. т натрия.

Геохимические особенности воздействия крупных промышленных производств на окружающую среду. В нашей стране широкие научно-методические и прикладные геохимические исследования урбанизированных территорий были начаты под руководством Ю.Е. Саета в 1976 году (Методические..., 1982; Сает и др., 1990). В 1970–80 гг. работы Б.Б. Чебаненко (1983), В.И. Валиковой (1985), В.А. Ветрова (1985) и др. внесли значительный вклад в изучение элементного состава атмосферных осадков на территории Южного Прибайкалья. Ими изучались изменения в составе атмосферных осадков в связи с промышленным освоением Иркутской области. Дана количественная оценка поступления веществ из атмосферы на акваторию озера, показана их роль в химическом балансе Байкала (Ходжер, 1987). Установлено, что в последнее десятилетие в химическом составе атмосферных осадков Байкальского региона произошли значимые изменения, увеличилось содержание растворимых форм металлов (Онищук, 2002).

Большое внимание уделяется исследованию воздействия алюминиевых заводов на окружающую среду (Belogolova et al., 1995). По данным Белозерцевой (2000; 2003) на территории до 1 км от завода в снеговой воде максимальная концентрация фтора достигает 66 мг/л. Величины коэффициентов концентрации Sr, V, Mg, Fe, Co изменяются от 60 до 40, у Pb, Ca, Cu от 60 до 100, для F, Al, Na, Mn, – более 100.

ГИС-технологии и физико-химические модели как способ представления данных мониторинга окружающей среды. Основная задача настоящего исследования – геостатистическая обработка химико-аналитических данных с целью комплексной оценки состояния экосистемы и определения зоны экологического риска. Для этого требуется установить степень загрязненности геосистем высокотоксичными веществами, определить формы существования элементов в газовой фазе, твердом состоянии и растворенном виде, построить карты ассоциаций элементов, накапливающихся в объектах окружающей среды.

Оптимальным способом анализа такой информации является картографическое представление, где значения контролируемых параметров визуализированы (цветом или знаком) в соответствии с критериями оценки состояния природной среды геосистемы. С помощью ГИС удобно представлять распространение загрязнения от точечных и пространственных источников на местности. Результаты модельных расчетов можно наложить на природные карты, например, карты растительности или же карты жилых массивов в данном районе. Это выводит мониторинг окружающей среды на качественно новый уровень, поскольку от момента сбора информации до получения результатов, необходимых для принятия решений, проходит минимальное время.

Основные принципы физико-химического моделирования процессов взаимодействия пылеаэрозолей с компонентами окружающей среды. Теоретические основы физико-

химического моделирования массопереноса в многорезервуарных системах методом минимизации свободной энергии Гиббса подробно описаны в работах (Карпов и др., 2001; Чудненко и др., 1999). Программный комплекс «Селектор-С» является примером мощного многоцелевого средства физико-химического моделирования процессов образования минеральных ассоциаций, флюидов, газов и растворов в широком диапазоне P - T условий (Чудненко, 2010).

Разработан сверхточный алгоритм МВТ (Chudnenko et al., 2002) с помощью которого можно исследовать геохимические модели, в которых содержание отдельных компонентов находится «в пренебрежимо малых количествах», но именно этими пренебрежимо малыми количествами по условиям решаемой задачи пренебречь нельзя. Именно такие процессы происходят при преобразовании газопылевых выбросов.

Выводы. Для выполнения эколого-геохимических исследований необходимо: установить ассоциации элементов-индикаторов, позволяющих идентифицировать источники загрязнения; рассчитать значения локального фона для элементов, поступающих в окружающую среду с выбросами; разработать способы геостатистической обработки химико-аналитических данных, позволяющие выполнять комплексную оценку состояния экосистемы на основе моно- и полиэлементных карт техногенной нагрузки; сформировать имитационную физико-химическую модель преобразования пылеаэрозолей в окружающей среде, позволяющую определить формы существования элементов в водных растворах, газах и твердых фазах с точки зрения оценки миграционной способности поллютантов.

Глава 2. Характеристика района исследования и методы исследования элементного состава снегового покрова

Физико-географическая характеристика района. Район исследования включает в себя город Шелехов, части Шелеховского и Иркутского районов (рисунок 1).

Филиал ОАО «РУСАЛ Братск» находится в Олхино-Иркутской предгорной впадине (Налунин, 1999) в 1,5 км к югу от г. Шелехова на 25–35 метровой террасе междуречья Иркут – Олха. Город расположен на первой-второй надпойменных террасах с высотой до 25 м.

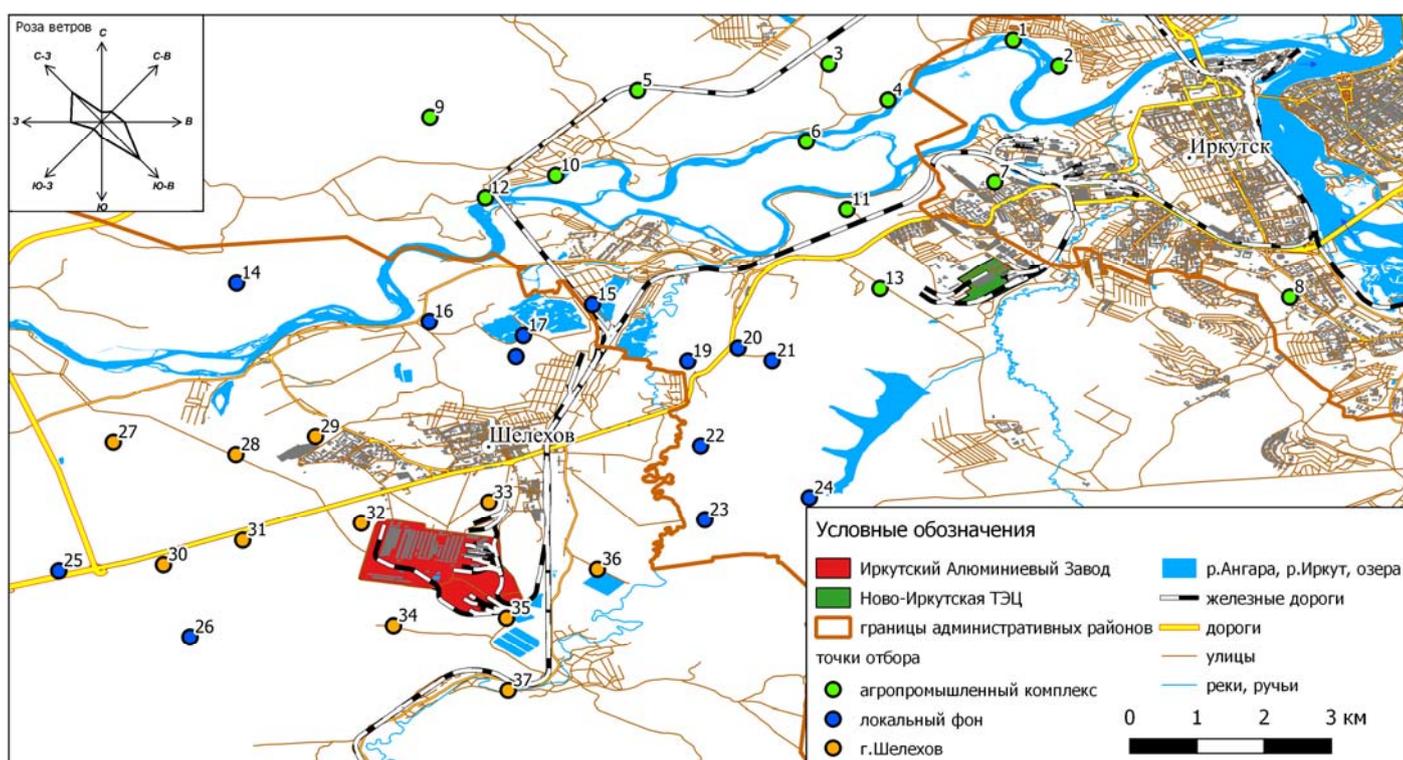


Рисунок 1 – Обзорная карта района исследования

Особенностью климатических условий территории является наличие на юго-востоке глубоководного внутреннего бассейна оз. Байкал, который предопределяет запаздывание весны, большую облачность летом, интенсивное развитие местных ветров и неравномерное распределение годовых осадков. Преобладают ветры западного и северо-западного направлений. Климат района резко континентальный с малоснежной зимой и с обильными осадками летом.

Слабые ветра, застои воздуха затрудняют рассеивание загрязняющих веществ и способствуют образованию смога над районом исследования. Влияние осадков дождя или снега заключается в захвате примесей и их переносе к подстилающей поверхности. Метеорологические условия, определяющие скорость самоочищения атмосферы для Иркутской области, неблагоприятны.

Основными источниками загрязнения атмосферного воздуха и других компонентов окружающей среды является Ново-Иркутская ТЭЦ, предприятие 2-го класса опасности (СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200_03), В выбросах алюминиевого завода преобладают высокомолекулярные ароматические углеводороды; высшие фенолы, асфальтены, соединения фтора, алюминия, натрия, серы. За счет автотранспорта происходит загрязнение природной среды Pb, Cr, Zn, Mn, Hg.

Методы исследования элементного состава снегового покрова и оценки техногенной нагрузки. Снеговая съемка проводилась в начале марта 2011–2014 годов. Схема отбора проб составлена с учетом розы ветров и характера рельефа, а также расположения и особенностей основных источников загрязнения. Учитывались сеть автодорог и положение жилых массивов. Все работы по отбору и подготовке снеговых проб выполнялись с учетом методических рекомендаций, приводимых в работах (Василенко, 1985; Назарова и др., 1978), методических рекомендаций ИМГРЭ (Методические ..., 1982), и руководства (РД 52.04.186–89). Отобрано 174 пробы. Аналитические работы выполнены в аккредитованном аналитическом отделе ИГХ СО РАН на оборудовании центра коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований».

Подготовка представления данных в картографическом виде. Необходимое требование к информационным материалам – способность определять фоновое значение контролируемого параметра, обеспечивая визуальное ранжирование геоэкологической обстановки по принципу: норма – допустимо – нехарактерно – опасно. Такой подход позволит эффективно обнаружить техногенное воздействие, определить его источник и обеспечить статистически обоснованные выводы о состоянии природной среды.

Для построения информативных карт необходимо соотнести измеренные величины с их «нормальными значениями» – фоном, природным состоянием среды. Это обусловлено тем, что Прибайкальские природные территории – это геосистемы, имеющие собственный локальный геохимический фон. Поэтому был выполнен расчет условно «фоновых» значений. В итоге был сформирован набор пространственных многомерных полей, каждое из которых отражает особенности процесса загрязнения. Серия картографических построений позволяет эффективно обнаруживать зоны загрязнения и типизировать их источники.

Прямое использование состава фоновых участков для построения геоэкологических карт затруднено, поскольку содержание отдельных элементов превышает их концентрации в техногенно-нагруженных участках. Поэтому использован следующий способ вычисления локального фона. Вначале рассчитаны среднее и медиана для фактических значений, затем из выборки данных удалены ураганные содержания и вычислены средние и медиана для усредненных значений. Это позволило улучшить результаты пространственной интерполяции.

Выводы. Проведенный анализ позволил определить приоритетные элементы, позволяющие дать полную геоэкологическую оценку территории; обоснованно определить плотность опробования и характер распределения и отбора проб. В качестве поллютантов выбраны: Be, Ba, Pb, As, S, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Li, Fe, B, Al, F – элементы, присутствующие в

выбросах алюминиевого завода, а также теплоэлектростанций и относящиеся к I (чрезвычайно опасные вещества) и II (высокоопасные вещества) классу опасности.

Определены значения локального фона для 26-ти микроэлементов в атмосферных аэрозолях и подобраны оптимальные методы статистической обработки аналитических результатов, позволяющие с помощью ГИС-технологий выявлять геохимическую специфику техногенно-нагруженных территорий в зоне воздействия алюминиевого завода.

Глава 3. Аэрозоли как показатель экологического состояния окружающей среды

Вещественный состав природных и техногенных пылеаэрозолей. В Восточной Сибири исследование атмосферных выпадений активно проводится с 1974 г. Большая работа осуществлена сотрудниками ПГО «Сосновгеология», Институтами СО РАН, Иркутским государственным университетом. Однако ряд вопросов требует дальнейшего изучения, в частности, слабо изучены формы существования элементов в снеговой воде и твердом осадке.

Минеральный и химический состав снегового покрова. Результаты рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) позволили установить зависимость состава твердых аэрозолей от интенсивности техногенной нагрузки. Это проявляется в изменении соотношения частиц природного и техногенного происхождения. Критериями для отнесения частиц к тому или иному типу служит фазовый и микроэлементный состав, а в ряде случаев и форма частиц. Так, например, муллит, магнетит и аморфизированный кварц, присутствующие в газопылевых выбросах электростанций, – оплавленные сферические частицы.

Твердый осадок снега фоновых участков представлен кварцем, полевыми шпатами, глинистыми минералами. Пыль техногенного происхождения содержит муллит, магнетит, оксиды алюминия, и др. Здесь под минералами техногенного происхождения понимаются компоненты, преобладающие в газопылевых выбросах теплоэлектростанций и металлургических производств, то есть образующиеся в высокотемпературных процессах. Следовательно, природные минеральные частицы состоят в основном из пороодообразующих элементов Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Fe, техногенные аэрозоли обогащены микроэлементами (Ni, Mn, Cd, Cr, Zn, Pb, Be и др.).

С помощью рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) в твердом осадке снеговых проб идентифицированы следующие типы техногенных частиц: Микросферулы светло-серого и белого цвета, размером от 3 до 100 мкм. Это крупные тяжелые частицы, состоящие из оксидов железа (67 %), алюминия (10 %) и обогащенные марганцем, медью, цинком, никелем, хромом. Частицы с изъеденной поверхностью также обогащены железом (78 %), серой и тяжелыми металлами. Также наблюдаются пористые пеплоподобные частицы размером 5–26 мкм, на 80 % состоящие из оксида алюминия и обогащенные тяжелыми металлами и фтором. Они обнаружены в пробах, отобранных в районе города Шелехова, поселка Олха и промышленной зоне алюминиевого завода. Пространственное распределение свидетельствует, что эти частицы поступают в окружающую среду с газопылевыми выбросами.

В результате выполненных исследований установлено, что в твердом осадке снеговых проб в районе ОАО «РУСАЛ Братск» преобладают частицы техногенного происхождения: оксиды, силикаты и фториды алюминия, оксиды железа, а также сульфиды железа. Все частицы обогащены тяжелыми металлами. Частицы с высоким содержанием фтора обнаружены в пробах, отобранных в районах, прилегающих к алюминиевому заводу. Присутствие в твердом осадке снега оплавленных гранул магнетита, кварцевого стекла, оксида алюминия, муллита, образование которых возможно только при высоких температурах, указывает на то, что эти частицы поступают в окружающую среду с выбросами ТЭЦ. Таким образом, минералогия пылеаэрозолей позволяет установить степень техногенной нагрузки, а микроэлементный состав и аморфизированность частиц характеризует их происхождение. Распределение таких элементов, как Cl, As, Ba, Pb, Cr, Zn, определяется в большей мере их сорбцией на поверхности частиц, следовательно, основная доля техногенной нагрузки – это выбросы алюминиевой промышленности и топливно-энергетического комплекса.

В результате удалось определить критерии техногенности минеральных частиц. Во-первых, это минеральный состав. Если в твердом осадке снега преобладают муллит, магнетит, аморфный кварц, фторид алюминия, ферросилит, анкерит, то, несомненно, это аэрозоли, которые имеют техногенное происхождение. Во-вторых, это частично оплавленные или вспученные частицы с относительно высокой степенью окатанности. И, главное, в химическом составе содержание фтора, алюминия, мышьяка, бериллия, кадмия строго взаимосвязано. Высокие концентрации алюминия характерны и для природных аэрозолей, однако в них содержание фтора существенно ниже. Содержание алюминия в снеговой воде на фоновых участках почти в три раза ниже, чем в зоне воздействия алюминиевых производств. Это еще раз подтверждает, что алюминий в техногенных пылеаэрозолях присутствует в легкорастворимых формах.

Закономерности пространственного распределения техногенной нагрузки.

Минерализация снеговых вод и содержание твердого осадка ($M_{ос}$) в снеге на территории исследованного полигона меняются в широких пределах 12,26–64 мг/л и 0,3–700 мг/л соответственно. В среднем величина пылевой нагрузки на территорию г. Шелехова и его окрестностей 72 мг/(м²·сут), что превышает фон в 9 раз. По степени запыленности исследуемые районы образуют следующий ряд: г. Шелехов – 264 мг/(м²·сут), поселок Олха – 351 мг/(м²·сут), поселок Баклаши – 107 мг/(м²·сут), поселок Силиваниха – 112 мг/(м²·сут), район Култукского тракта – 127 мг/(м²·сут).

В Прибайкалье фоновое загрязнение атмосферы на порядок меньше, чем в европейской части России. Вследствие чего пылеаэрозоли Шелеховского промышленного района относительно локального фона в 2–11 раз обогащены Si, Al, F, Na, Fe, Mn, Be и др. Превышение их содержания над региональным фоном происходит за счет выбросов промышленных производств – алюминиевого завода и теплоэнергетических комплексов, тогда как Cu, Pb, Zn, Hg, Cr поступают в атмосферу из локальных источников и связаны, главным образом, с автотранспортом.

В зоне действия алюминиевого завода (радиус 1,5–2 км) содержание фтора в снеговой воде превышает фоновые показатели в 12–20 раз. Площадь загрязнения фтором, поступающим с твердыми аэрозолями, значительно меньше, тем не менее, его содержание не только превышает фоновые значения, но и ПДК для почв (рисунок 2). Преобладающие формы его существования в газопылевых выбросах – это AlF_3 и газы NaF, HF, CaF_2 . Следовательно, в районе воздействия алюминиевого завода возможно формирование аномалии фтора в почвах.

Кластерная диаграмма показывает, что состав снега имеет пространственную приуроченность, большая часть проб группируется в кластеры в зависимости от их расположения по отношению к зоне воздействия основных источников загрязнения. Это объясняется тем, что по спектру элементов аэрозоли из зон с разной техногенной нагрузкой существенно отличаются геохимической спецификой и, следовательно, минеральным составом. Так в зону, на которую распространяется воздействие алюминиевого завода, объединились как пробы, отобранные в непосредственной близости к комбинату (29, 32, 33, 34, 35), так и в прилегающих жилых районах (16, 23, 27, 28, 29). Группы снеговых проб, отвечающие максимальной нагрузке, созданной выбросами завода, для нерастворимого осадка и снеговой воды совпадают. Кластеры, условно отвечающие локальному фону, сформировали пробы, отобранные в пригородных рекреационных зонах (12, 13, 14, 21, 22, 24). В отличие от снеговой воды, в твердом осадке эти пробы образовали более обширную группу, объединившись с пробами, отобранными на границе зоны воздействия Ново-Иркутской ТЭС. Это закономерно, так как на данную территорию воздействие алюминиевого завода не распространяется, содержание F, Na невысоко. Третью группу сформировали пробы, отобранные на территории агропромышленного комплекса (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 11, 18, 20) с низким содержанием F, Al, Ni, As, Pb и незначительным превышением фоновых значений В, Ва, Cu, Fe, Sc, Cu, Р. Эти данные свидетельствуют о том, что в районе с высокой плотностью населения, но малым числом промышленных предприятий, состояние окружающей среды в целом благополучное.

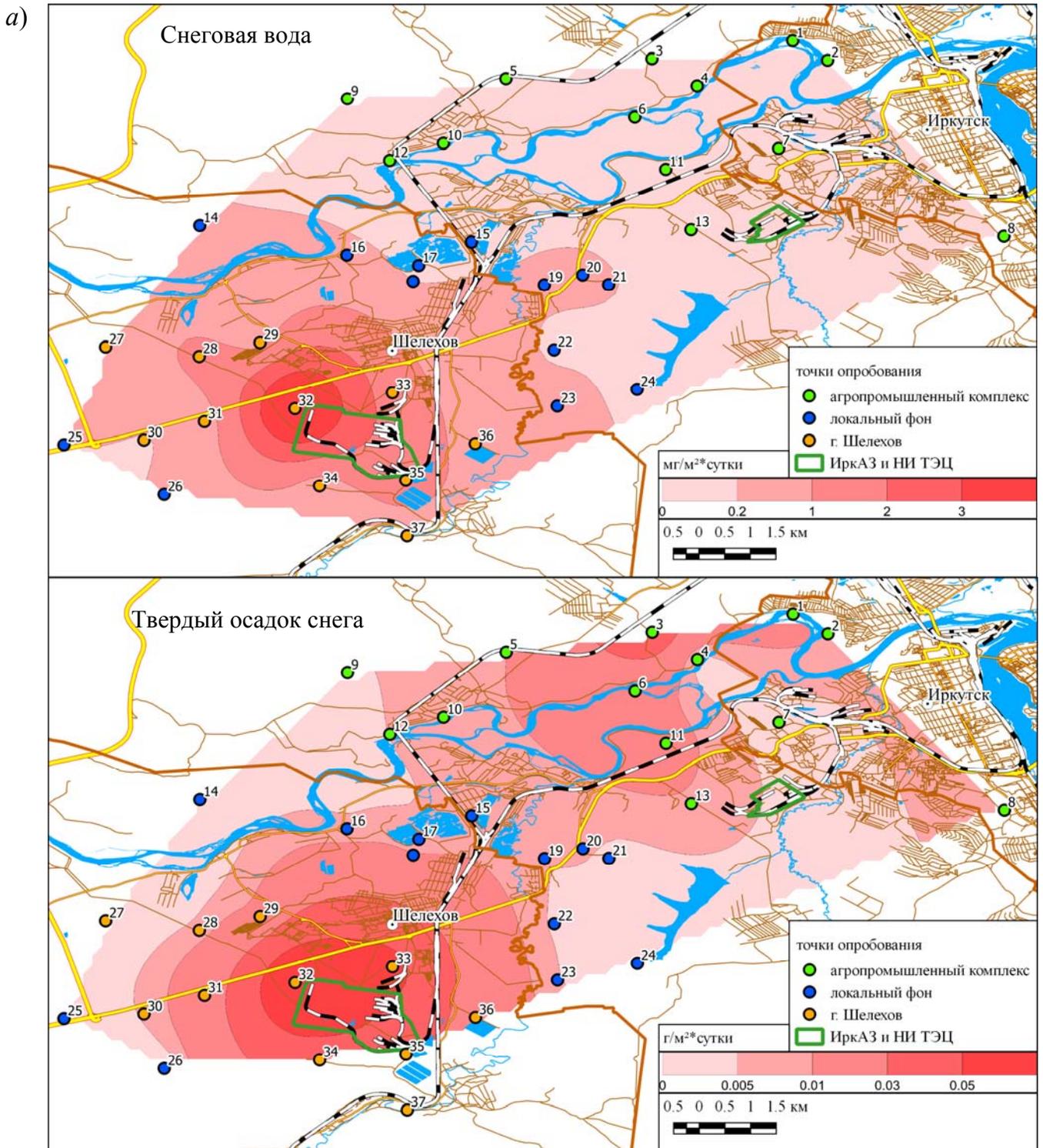


Рисунок 2 – Распределение алюминия и фтора на территории исследования: *а* – содержание алюминия в снеговой воде и твердом осадке снега; *б* – содержание фтора в снеговой воде и твердом осадке снега

Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Шелехова с помощью геоинформационного обеспечения. Величина pH не зависит от массы твердого осадка и минерализации. В зависимости от типа производств, в техногенной нагрузке могут преобладать как щелочные, так и кислотные элементы, поэтому щелочность снеговой воды может, как возрастать, так и снижаться. В зоне воздействия алюминиевого завода в снеговых водах высокое содержание компонентов, участвующих в подкислении: SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , F^- , нейтрализуется воздействием выбросов смежных производств: NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ . Поэтому фоновым участкам свойственны более низкие величины pH (~5,2), чем промышленной зоне, где, благодаря увеличению содержания щелочных элементов, pH незначительно возрастает (> 6,0).

б)

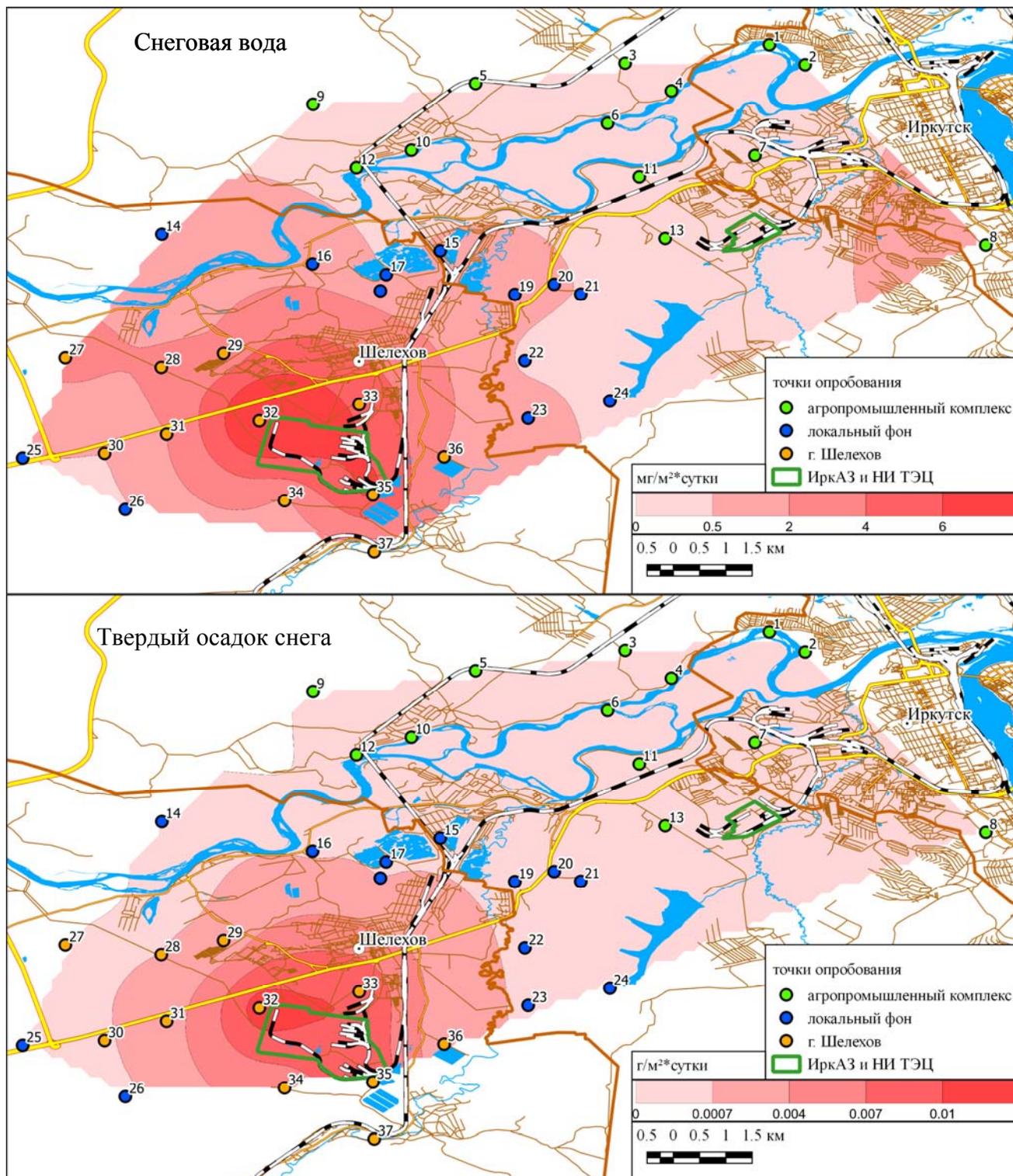


Рисунок 2 – Окончание

Уровень загрязнения снеговой воды определяли путем сравнения фактического содержания элементов с локальным фоном. Содержание алюминия в снеговой воде меняется в широких пределах от 23 до 12000 мкг/л. Так, в пробах, отобранных в зоне алюминиевого завода, его содержание более чем в 8 раз превышает фоновое (рисунок 2а). Дело в том, что алюминий в фоновых аэрозолях присутствует в природных аэрозолях в виде алюмосиликатных минералов. Именно этим объясняется существенное различие в его растворимости. Алюмосиликаты – это слаборастворимые соединения, тогда как в газопылевых выбросах алюминий присутствует и в газообразных формах AlF_2O , AlF_3 , $NaAlF_4$, Na_3AlF_6 , и как легко растворимые твердые фазы Na_3AlF_6 , $Na_5Al_3F_{14}$.

Фтор в твердом осадке присутствует в легкорастворимой форме, поэтому контуры техногенной нагрузки растворимых и нерастворимых форм совпадают (рисунок 2б). Максимальное содержание бериллия в твердом осадке также обнаружено на территории, прилегающей к алюминиевому заводу, однако и в агропромышленном районе его содержание превышает фоновые концентрации. Ореолы максимальной нагрузки Be, поступающего со снеговой водой, приходится также на территорию завода. Это свидетельствует о том, что Be в газопылевых выбросах алюминиевого производства существует в растворенном виде как в форме фторидов и хлоридов, так и в виде твердых частиц. Подобным образом распределяется техногенная нагрузка таких элементов как натрий, кремний, кадмий, мышьяк, их ореолы с высоким содержанием растворимых форм локальны и приурочены к главному источнику – алюминиевому заводу. Алюминий во всех источниках загрязнения, кроме алюминиевого завода, существует в труднорастворимой форме, поэтому образуется несколько взаимоперекрывающихся зон загрязнения алюминием, в то время как его высокие концентрации в водном растворе локализованы в зоне алюминиевого завода.

Сравнение данных, полученных в 2013–2015 годах (Филимонова, 2015; Головных, 2004; Знаменская, 2015; Белозерова, 2002), с результатами исследований снегового покрова (Ходжер 2005, Belogolova, Koval, 1995) показали, что химический состав атмосферных осадков в Иркутско-Шелеховском промышленном районе изменился. Возросла доля сульфатов, фторидов, хлоридов, а щелочноземельных элементов сократилась. Как в снеговой воде, так и в твердом осадке снега вблизи алюминиевого завода происходит накопление таких элементов как Li, Ni, Be, F, Al. Следовательно, более точную оценку атмосферного загрязнения можно получить, построив карты распределения нагрузки по аддитивным показателям – ассоциациям элементов, накапливающимся симбатно, физико-химическим параметрам атмосферных осадков – Eh, pH, TDS и пылевой нагрузке. Среди детерминистских методов наиболее известен кластер-анализ. Метод позволяет выделять новые, не предполагаемые классы, без каких-либо априорных соображений. Объективное разделение на группы сравнительно однообразной (в петрохимическом смысле) выборки анализов выявляет отличия, которые трудно обнаружить при обычной статистической обработке векторов химических составов. В результате кластеризации установлено, что основной поставщик Al, F, Cl, Pb, Be, Ni, Li, Zn, Cd, Pb, Cr, окислов серы, азота – алюминиевый завод, теплоэнергетический комплекс и автотранспорт. Ca, Mg, Na имеют преимущественно природное происхождение. Это позволило выявить зоны с высокой техногенной нагрузкой и рассчитать годовые потоки растворимых и твердых веществ. Удалось разделить вклад естественных и антропогенных источников.

Количественное соотношение отдельных элементов, поступающих в окружающую среду с газопылевыми выбросами в растворенном виде и с твердыми аэрозолями, неоднородно. Так, если ореолы As, F, Sr, Ca, Na, Ni снеговых вод и твердого осадка совпадают, то для V, Cd, Zn, Pb, K, Hg, Ag они существенно различаются (рисунок 3). Основная причина в формах их существования в газопылевых выбросах, поступающих из разных источников.

Геоинформационные карты строятся по валовому содержанию элементов, коэффициентам их концентраций и сезонной нагрузке. Количественной мерой воздействия ассоциации элементов на окружающую среду служит суммарный показатель загрязнения, вычисляемый по формуле: $Z_C = \left(\sum_{i=1}^n K_C \right) - (n-1)$, где n – число элементов, K_C – коэффициент концентрации, $K_C = C/C_\phi$; здесь C – содержание элемента в пробе, C_ϕ – фоновое содержание.

Величина суммарного показателя загрязнения соответствует умеренно опасному (рисунок 4). Зоне воздействия алюминиевого завода свойственно высокое содержание Al, As, Ni, F, Cd, Pb, а Иркутскому району – Mg, Ca, Cu, Fe, Mn, B, Sc Sr. Высокое содержание Fe, Mn, Cr – следствие воздействия автотранспорта. Наиболее высокий уровень суммарного загрязнения Z_C приходится на промышленную зону завода и пригород г. Шелехова. Эта техногенная аномалия характеризуется высоким содержанием Al, F, As, Ba, Pb, Ni, Cu, Zn в твердом осадке снега, что является надежным свидетельством воздействия алюминиевого производства.

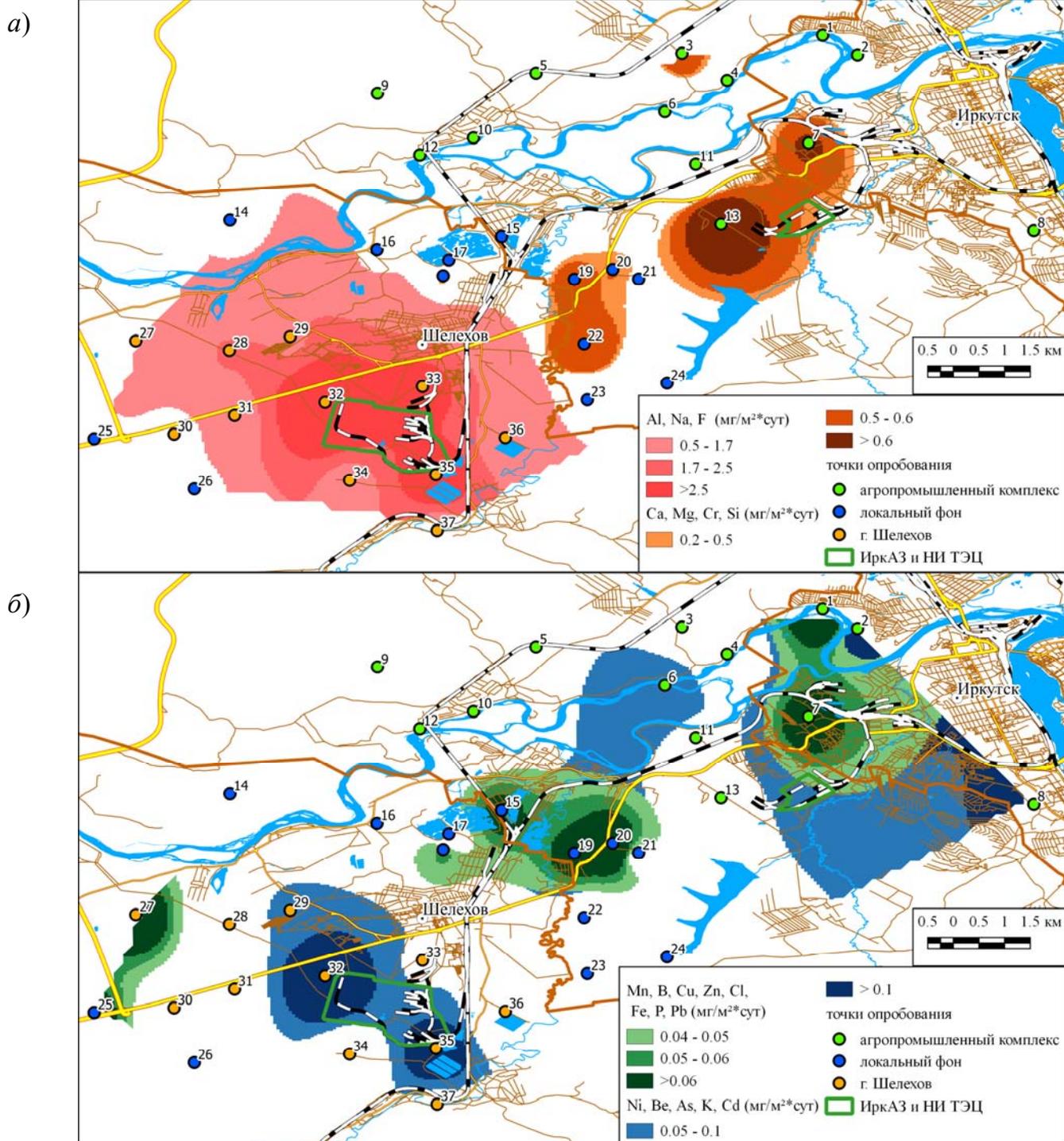
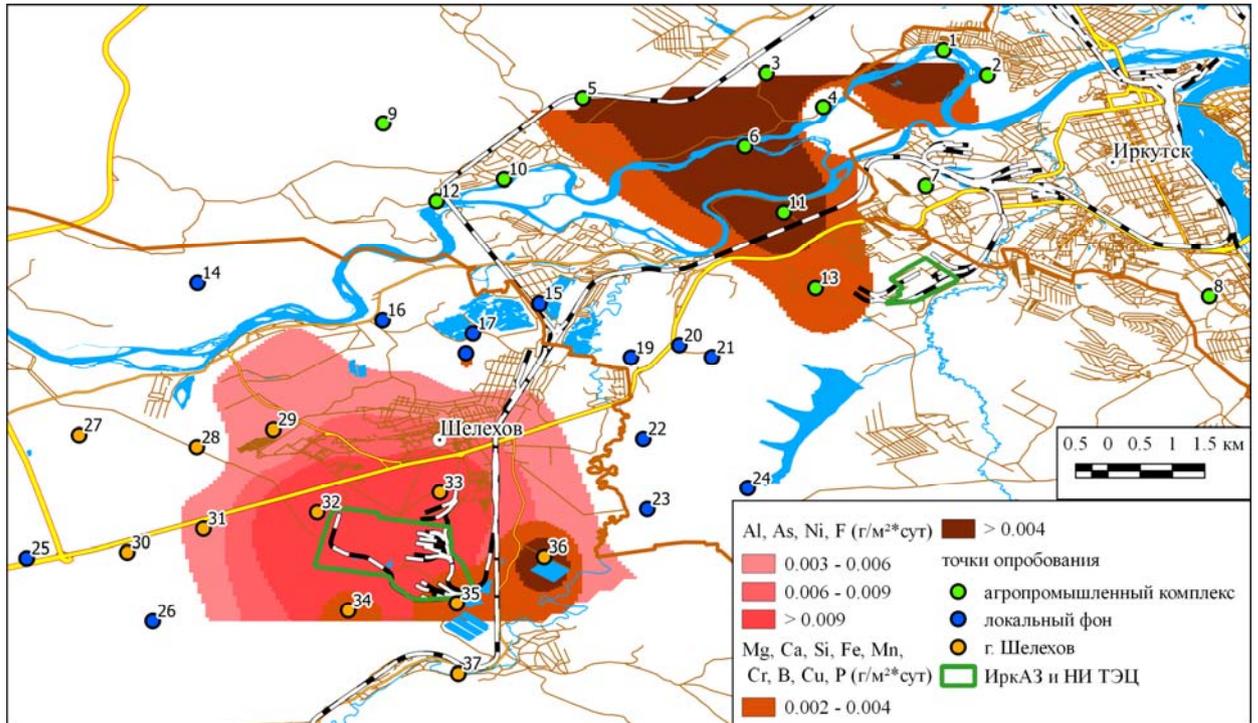


Рисунок 3 – Ассоциации элементов водного раствора (а, б) и твердого осадка снега (в, г)

Выводы. Рассчитан региональный геохимический фон снегового покрова для 26 элементов, на основе которого выявлены зоны с высокой техногенной нагрузкой (таблица 1). Минеральные фазы в аэрозолях природного происхождения представлены кварцем, каолинитом, полевыми шпатами, слюдами. В меньших количествах присутствуют гиббсит, гематит, смешанно-слоистые алюмосиликаты, карбонаты. Муллит, магнетит, аморфный кварц, окислы кальция и магния – индикаторы газопылевых выбросов теплоэнергетики. Выбросы алюминиевых заводов представлены γ - Al_2O_3 , флюоритом, фторидом алюминия. Токсичные элементы (As, Cd, F, Al) существуют в виде примесей в основных минеральных фазах, либо в виде самородных фаз и окислов. Величина Z_c Шелеховского промышленного района соответствует умеренно опасному. Исследование состава снежного покрова показывает, что основным источником Al, As, Ni, F является алюминиевый завод, Si, Fe, Mn, B – теплоэнергетический комплекс, V, Zn, Cd, Pb – автотранспорт, Ca, Cr, Mn, Cu, S – дорожное и жилищное строительство.

б)



в)

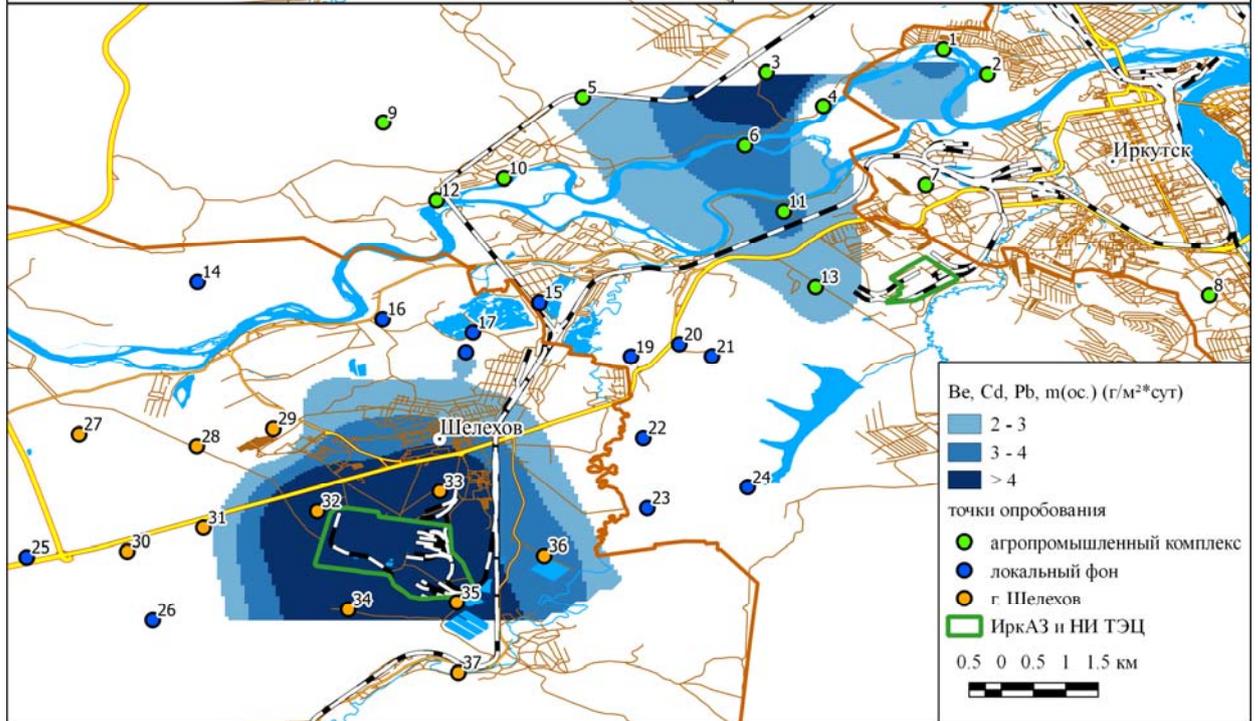


Рисунок 3 – Окончание

Таблица 1 – Коэффициенты концентрации элементов в техногенно-нагруженных зонах

Среда	Коэффициенты концентрации – <i>КК</i>
Снег (твердый осадок)	В (12), Pb (10), F (8), As (7), Zn (6), Cr(4), Cu (3), Mn(4), Ni (3), Be(3), Cd(6), Ba(3), Fe (2), Al (2), Si(2)
Вода	F (21), Al (20), В (12), Li (10), Mn (10), Na (10), Zn (10), As (8), Ni (7), Cu (7), Cr (6), Pb (5), Fe (4), Ba (2)

Примечание. Элементы в таблице перечислены в порядке убывания *КК*.

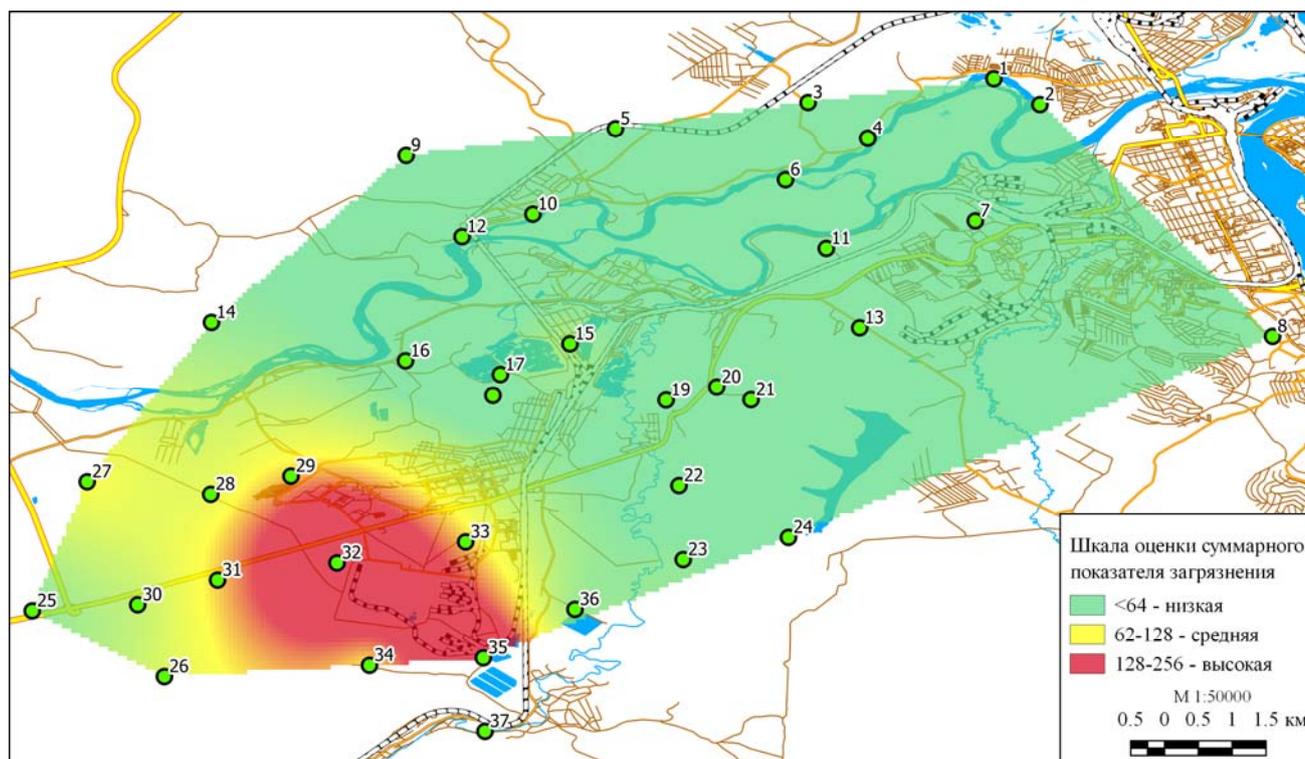


Рисунок 4 – Суммарный показатель промышленного загрязнения алюминиевого завода

Глава 4. Физико-химическая модель атмосферных осадков, формирующихся в зоне влияния алюминиевых производств

Физико-химическая модель включает 31 независимый компонент: С, Cd, Cl, N, S, Sc, As, Hg, Li, Sb, Sn, Sr, В, Ве, Са, Cr, F, Ni, P, Pb, Rb, Al, Cu, Fe, К, Mg, Mn, Na, Si, V, Zn, H, O, e (e – электрон) и 850 зависимых компонентов (включая газы, водный раствор и твердые фазы). Термодинамические свойства растворенных веществ и твердых фаз взяты из (Helgeson et al., 1998; Дорогокупец, Карпов, 1984), газов (Reid et al., 1977).

Исследовалось взаимодействие талой воды с твердым осадком снега. Определялись формы существования химических элементов в водном растворе и минеральный состав равновесных с ним твердых фаз. Критерием адекватности модели является соответствие результатов расчетов химико-аналитическим данным. В первую очередь, это общая минерализация, рН, Eh и содержание макрокомпонентов (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+} , Cl^{-} и т.д.). Изменение соотношения вода – твердый осадок позволяет исследовать основные закономерности преобразования элементов, поступающих в окружающую среду, как с талой водой, так и с твердыми аэрозолями. Подобран сценарий взаимодействия твердый осадок снега – раствор, описывающий изменение соотношения реальной пылевой нагрузки и количества влаги. Количество твердого осадка, накопленного в снеге (n грамм), вступая во взаимодействие с влагой, изменялось по экспоненциальной шкале от $n \cdot 10^{-7}$ менее микрограмма, до $n \cdot 10^0$ всей массы пыли, поступившей на данную территорию (в пересчете на 1 кг H_2O снеговой воды).

Из массива данных снегогеохимической съемки Иркутско-Шелеховского промышленного района выделены зоны, характеризующие геохимические особенности окружающей среды вблизи алюминиевого производства (пробы 32) и фоновой зоны (пробы 17).

(32) – проба отобрана в промышленной зоне алюминиевого завода. Снеговая вода пробы отличается высокой минерализацией – 75 мг/л, содержание фтора достигает 21,9, а алюминия 12,0 мг/л. Количество Na и K превышают средние концентрации по промышленному району. Количество твердого осадка незначительно $0,01 \text{ г/дм}^3$, поэтому в процессе взаимодействия твердого осадка со снеговой водой увеличения минерализации не происходит, щелочность среды остается неизменной (рисунок 5).

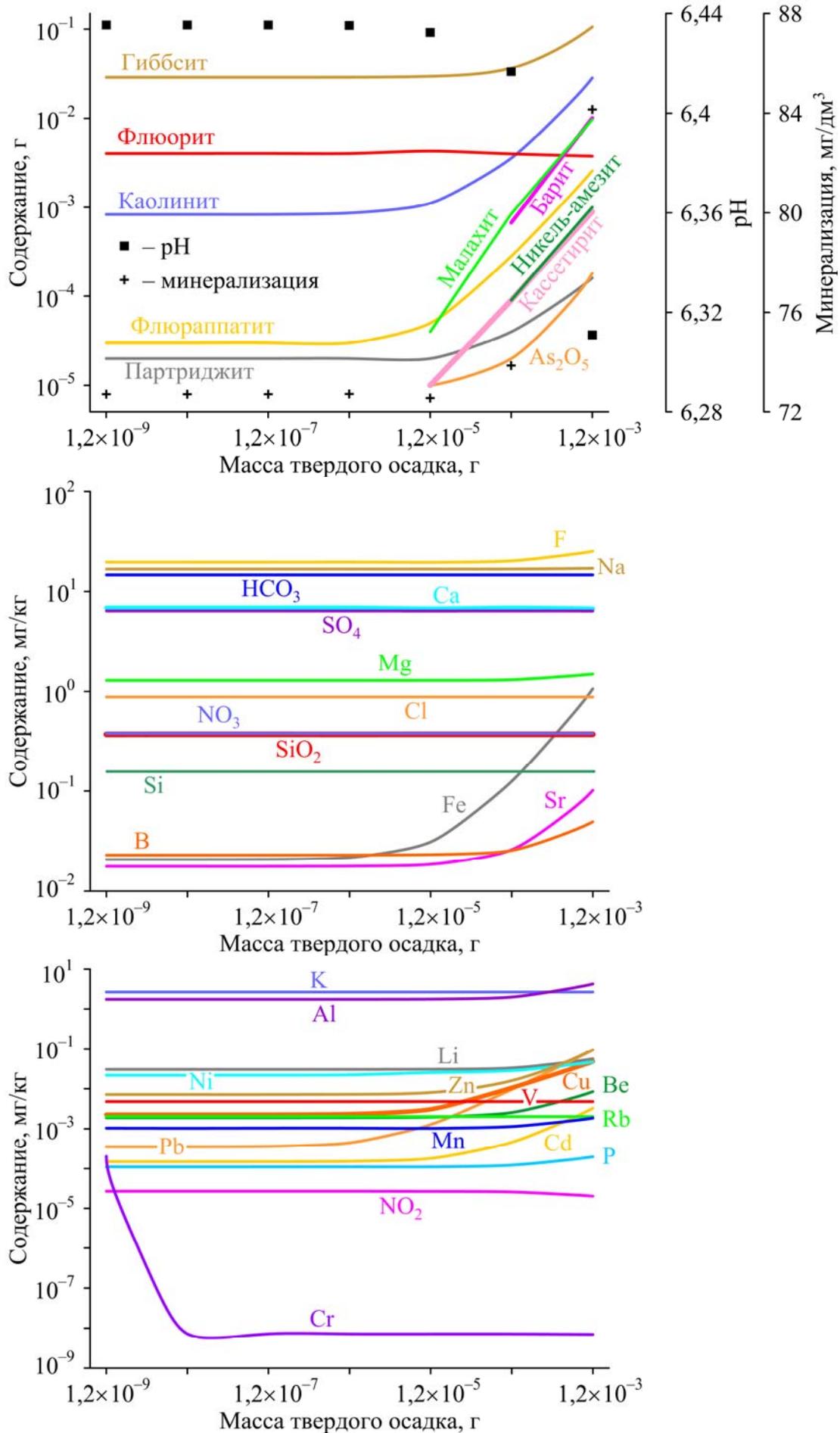


Рисунок 5 – Образование аутигенных минеральных фаз и изменение растворимости основных компонентов при взаимодействии твердого осадка снега со снеговыми водами (проба 32)

На первых стадиях взаимодействия твердого осадка со снеговой водой формируются партриджит, гиббсит, флюорапатит, флюорит, каолинит, на завершающих – барит, малахит, Ni-амезит, касситерит, As_2O_5 . Вследствие минералого-геохимической специфики газопылевых выбросов в водном растворе накапливаются F, Al, Fe, Cu, Pb, Sr, Cd, Be, Zn, Mn, Mg, содержания K, Ca, Na, Si, Li остаются практически неизменными. Кремний, алюминий, кальций, мышьяк, хром и марганец в виде окислов, гидроокислов, алюмосиликатов накапливаются в почве (см. рисунок 5). Таким образом, в зоне воздействия основные токсичные элементы концентрируются в водном растворе.

(17) – проба отобрана в точке, равноудаленной от алюминиевого завода, Ново-Иркутской ТЭЦ и источников загрязнения, таких как котельные и цементный завод. Ее физико-химические характеристики позволяют оценить аддитивную техногенную нагрузку на зоны отдыха и жилые массивы. Сравнение с составом проб, отобранных на фоновых участках, показало, что состояние окружающей среды в пригородных районах в целом благоприятно. Снеговые воды имеют слабокислую pH (6) и малую минерализацию, что объясняется низкой для данного района пылевой нагрузкой.

Растворение твердого осадка снега приводит к увеличению минерализации снеговой воды (38–41 мг/л), pH становится слабощелочным (8,1). Содержание Ca, Na, F, Zn, Li, Be в растворе незначительно возрастает. Увеличение концентрации Si, Pb, Cd, B, Be, Sr, Mg, Fe более заметно. Содержание таких элементов как SO_4 , Cl, Rb, V остается неизменным, а содержание Al, Cu, Ni, Mn, P, Cr, напротив, убывает (рисунок 6). Основные формы существования элементов в растворе – это обычные катионы, окислы и гидроокислы. На начальных этапах растворения твердого осадка образуются каолинит, гиббсит, флюорапатит, крокоит As_2O_5 , касситерит, на завершающих – партриджит, антигорит-хризотил, малахит (см. рисунок 6).

Выводы. Результаты физико-химического моделирования процессов взаимодействия твердых аэрозолей и снеговых вод показывают, что поступившие с газопылевыми выбросами стронций, фтор, кадмий, свинец растворяются и постепенно выносятся из почв. Никель, медь, марганец, хром накапливаются в труднорастворимых формах.

В зонах с повышенной техногенной нагрузкой происходит относительный рост содержания ионов в снеговой воде в такой последовательности: $SO_4^{2-} \rightarrow Cl^- \rightarrow F^- \rightarrow Ca^{2+} \rightarrow Mg^{2+} \rightarrow Na^+$. Так, в снеговой воде в значимых количествах образуются $Be(OH)^+$, NiF^+ , $Ni(OH)^+$, $PbCl^+$, $Pb(OH)^+$, PbF^+ , $Fe(OH)_4^-$, $Zn(OH)^+$, ZnF^+ , CuF^+ , $Cu(OH)^+$, $MnCl^+$, MnF^+ , $MnSO_4^0$, $CdCl^+$, $Cd(OH)^+$. Алюминий и железо, напротив, существуют в виде AlF^{2+} , AlF_2^+ , AlF_3^0 и $Fe(OH)_4^-$, так как растворимость этих элементов в условиях фторидного загрязнения возрастает. В твердом осадке накапливаются новообразованные минеральные фазы: гиббсит, каолинит, манганит и флюорапатит, Zn_2SiO_4 , $Be(OH)_2$, As_2O_5 , $Cu(OH)_2$, партриджит, CrO_2 , CaF_2 , флюорапатит, на завершающих – Ni-амезит, касситерит. Следовательно, преобразование аэрозолей в зоне непосредственного воздействия алюминиевого завода отличается от процессов, протекающих на фоновых территориях: здесь основные токсичные элементы накапливаются в водном растворе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пылеаэрозольное загрязнение Шелеховского промышленного района формирует специфическую литохимическую аномалию площадью около 16 км². Она представлена ассоциацией элементов, контрастной по отношению к фоновым участкам (КК: В – до 4; F – до 12, As до – 6, Zn – до 4, Cu – до 4, Mn до 4, Ni – до 5, Fe – до 6, Cr – до 4, Al – до 23). Компонентами, накапливающимися в окружающей среде в содержаниях, превышающих санитарные нормы, являются соединения F, Al, Cr, Mn, Mo.

Главными минеральными фазами во всех отобранных пробах являются фторид алюминия, γ -глинозем, муллит, кварц, плагиоклаз, слюды. В меньших количествах присутствуют каолинит, глинистые минералы, карбонаты. Токсичные элементы (As, Cd, F, Al) существуют в виде примесей в основных минеральных фазах, либо в виде самородных фаз и окислов.

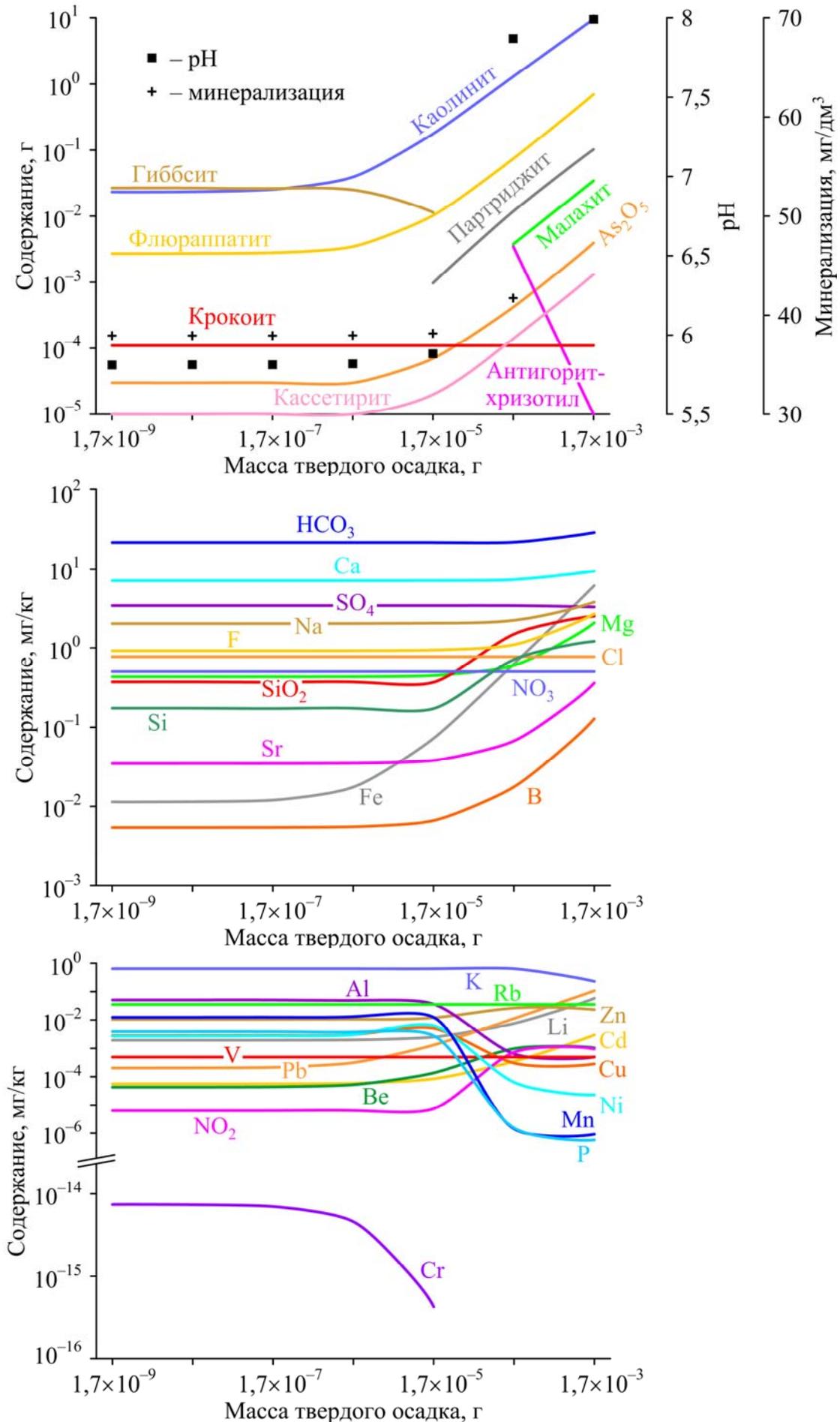


Рисунок 6 – Изменение растворимости основных компонентов газопылевых выбросов и образование аутигенных минеральных фаз в процессе взаимодействия твердый осадок – снеговая вода (проба 17).

Разработанная методика ГИС-анализа позволила установить закономерности распределения поллютантов в снеговом покрове района работ. Пространственное распределение техногенной нагрузки показывает, что наибольшую опасность представляют выбросы топливно-энергетического комплекса, алюминиевый завод, предприятия стройиндустрии. Вследствие этого возникли устойчиво существующие локальные специфические геохимические аномалии, позволившие установить главные источники загрязнения. Это алюминиевый завод, твердые аэрозоли которого отличаются высоким содержанием Al, As, Ni, F, Cd, Be, топливно-энергетический комплекс в сочетании с частным сектором – Si, Al, Fe, Mg, Mn, P, Zn, Cr, Cu, Ca, Sr. Снеговым водам зоны воздействия алюминиевого завода свойственно высокое содержание Na, F, Be, Li, Ni, Al, As, а теплоэнергетический комплекс поставляет в окружающую среду легкорастворимые Ca, Cl, Cr, Fe, Si.

Результаты физико-химического моделирования показывают, что поступившие с газопылевыми выбросами Sr, F, Cd, Pb постепенно выносятся из почв, а Ni, Cu, Mn, Cr накапливаются в труднорастворимых формах. Основные элементы выбросов алюминиевого производства (F, Al, Be, Na, As), присутствующие в водном растворе и минеральных фазах, не представляют серьезной экологической проблемы для территорий, удаленных от завода более чем на 5 километров. В зонах с повышенной техногенной нагрузкой содержание ионов в снеговой воде возрастает в следующей последовательности: $\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{Cl}^- \rightarrow \text{F}^- \rightarrow \text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Na}^+$. В значимых количествах присутствуют $\text{Be}(\text{OH})^+$, NiF^+ , $\text{Ni}(\text{OH})^+$, PbCl^+ , $\text{Pb}(\text{OH})^+$, PbF^+ , $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$, $\text{Zn}(\text{OH})^+$, ZnF^+ , CuF^+ , $\text{Cu}(\text{OH})^+$, MnCl^+ , MnF^+ , MnSO_4^0 , CdCl^+ , $\text{Cd}(\text{OH})^+$. Алюминий существует в виде AlF_2^+ , AlF_3^0 , так как его растворимость в условиях фторидного загрязнения возрастает. В твердом осадке накапливаются новообразованные минеральные фазы: гиббсит, каолинит, манганит, фторапатит, Zn_2SiO_4 , $\text{Be}(\text{OH})_2$, As_2O_5 , $\text{Cu}(\text{OH})_2$, партриджит, CrO_2 , CaF_2 , на завершающих – Ni-амезит, касситерит. Следовательно, преобразование аэрозолей в зоне непосредственного воздействия алюминиевого завода отличается от процессов, протекающих на фоновых территориях, поскольку здесь основные токсичные элементы накапливаются в водном растворе.

Твердые аэрозоли на фоновых участках представлены каолинитом, мусковитом, карбонатами терригенного происхождения. Снеговые воды имеют слабокислую pH (5,8) и малую минерализацию, что объясняется низкой для данного района пылевой нагрузкой. Преобразование твердого осадка снега незагрязненных территорий приводит к незначительному увеличению минерализации снеговой воды (до 38 мг/л), pH становится слабощелочным (8,0). Содержание Ca, Na, F, Zn, Li, Be, S, Ca, Cl в водном растворе остается постоянным, рост концентраций Si, Pb, Cd, B, Sr, Mg, Fe незначителен. Основные формы существования элементов в растворе – обычные катионы и гидроксиды.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

Филимонова, Л.М. Оценка атмосферного загрязнения методами геохимической съемки снегового покрова в районе алюминиевого производства / **Л.М. Филимонова**, А.В. Паршин, В.А. Бычинский // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 7–2. – С. 75–84.

Головных, Н.В. Геоэкологические исследования загрязненности почв в зоне влияния алюминиевого завода / Н.В. Головных, В.А. Бычинский, О.М. Глазунов, **Л.М. Филимонова** // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. – 2014. – С. 224–232.

Головных, Н.В. Моделирование и сокращение потерь фторсодержащих компонентов в производстве алюминия / Н.В. Головных, В.А. Бычинский, **Л.М. Филимонова**, К.В. Чудненко // Химическая технология. – 2016. – № 2. – С. 65–73.

Просекин, С.Н. Физико-химическая модель как способ геоэкологического прогноза и контроля состояния окружающей среды / С.Н. Просекин, **Л.М. Филимонова** // Успехи современной науки и образования. – 2017. – № 2 – С. 200–208.

Головных, Н.В., Бычинский В.А., **Филимонова Л.М.**, Чудненко К.В., Шепелев И.И. Повышение эффективности систем газоочистки в алюминиевом производстве // Известия вузов. Цветная металлургия, 2017, № 4 (в печати)

Статьи в рецензируемых сборниках

Филимонова, Л.М. Экологическая оценка состава поверхностных вод в зоне влияния нефтегазоконденсатных месторождений Катангского района (Иркутская область) // Экологические и медицинские проблемы Сибири. – Ангарск, 2012.

Филимонова, Л.М. Эколого-геохимическая оценка почвенного покрова в зоне влияния нефтегазоконденсатных месторождений Катангского района (Иркутская область) // Актуальные проблемы геологии, планетологии и геоэкологии. – Иркутск, 2013.

Филимонова, Л.М. Исследования содержания ртути в зоне влияния промышленных районов на примере города Шелехов / Л.М. Филимонова, О.С. Рязанцева // Сборник тезисов: Экологическая геология и рациональное недропользование. – Санкт-Петербург, 2013.

Филимонова, Л.М. Оценка атмосферного загрязнения методами геохимической съемки снегового покрова в районе алюминиевого производства // Современные наукоемкие технологии, 2014. – № 7–2. – С. 47–49.

Головных, Н.В. Оптимизация рециклинга фторсодержащих соединений в производстве алюминия / Н.В. Головных, В.А. Бычинский, **Л.М. Филимонова**, К.В. Чудненко // Цветная металлургия. – 2016. – С. 64–69.

Просекин, С.Н. Опыт геоинформационного картирования результатов снегогеохимической съемки / С.Н. Просекин, **Л.М. Филимонова**, В.А. Бычинский // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 4–4. – С. 683–685.

Просекин, С.Н., Бычинский В.А., **Филимонова Л.М.** Особенности использования ГИС-технологий в решении геоэкологических проблем (оценка состояния и прогноз последствий) // Вопросы естествознания. Науки о Земле. – 2015. – Т. 6, №2. – С. 101–104.

Подписано к печати 20.07.2017 г.

Формат 60*84/16. Объем 1,2 п.л. Тираж 150 экз. Заказ № 724.

Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН.

664033 г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1.