

Семинар «ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ»

**РОЛЬ МЕТРОЛОГИИ ПРИ ЭКОГЕОЛОГИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЯХ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗА КАТАСТРОФИЧЕСКИХ
ЯВЛЕНИЙ И ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ**

А.М. Блюменцев¹, А.В. Николаев², И.А. Лучин³, А.Е. Синельников³, И.М. Хайкович³ -

¹ВНИИГеосистем, Москва

²ИФЗ РАН, Москва

³ВИРГ-Рудгеофизика, С-Петербург

29 сентября 1999 г. Постановлением Правительства РФ утверждена Федеральная целевая Программа «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации», основным заказчиком - координатором которой является Министерство РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям (ЧС) и ликвидации последствий стихийных бедствий, а в числе основных Заказчиков выступают: то же Министерство и Российская академия наук.

В указанной Программе не введен предусмотренный ранее раздел «метрологическое обеспечение», поэтому необходимо рассмотреть проблему экомониторинга с точки зрения метрологического обеспечения при решении поставленных Программой задач.

1. В последние годы резко возрос интерес к вопросам, связанным с экологией геологической среды как среды обитания человека. Проведенный анализ многочисленных публикаций на эту тему показывает, что, несмотря на частные успехи в данной области знаний, до сих пор нет единой концепции экогеологического мониторинга. Это связано с тем, что большинство исследователей в каждом конкретном случае решают свои частные задачи и очень редко привлекают комплекс методов для изучения экологической обстановки. Примером такого одностороннего подхода может служить радиационный мониторинг в районах действующих АЭС - по измерениям радиационной составляющей только вблизи АЭС, или мониторинг подземных вод - по результатам измерений электрических полей, мониторинг землетрясений - по измерениям напряжений в земной коре и т.д. В то же время все эти измерения являются частью единой системы экогеологического мониторинга и измерение только одной составляющей без учета конкретной геологической обстановки приводит к потере важной и подчас невозполнимой информации об изменении геологической среды в целом. Последствия такого однобокого мониторинга не могут привести к предсказанию не только катастрофических, но подчас и чрезвычайных ситуаций.

2. Катастрофические или чрезвычайные явления в литосфере (точнее - в ноосфере), вызванные как природными (естественными), так и техногенными причинами, по скорости их проявления и по природе можно условно разделить на «эволюционные», которые связаны с накоплением вредных веществ в земной коре и в атмосфере, и «революционные» («взрывные»), которые обусловлены выделением больших количеств энергии за сравнительно короткие промежутки времени. Типичные проявления «эволюционных» катастроф обусловлены загрязнением окружающей среды бытовыми отходами селитебных территорий и промышленных предприятий техногенными объектами. К «революционным» следует отнести катастрофы, вызванные природными факторами - землетрясения, цунами, смерчи и пр., а также события, связанные с недостаточным учетом состояния геологической среды при проектировании и строительстве крупных промышленных объектов. Ко второй группе необходимо отнести также последствия ядерных и крупных промышленных взрывов, производимых в различных целях.

3. Процесс «подготовки катастрофы» сопровождается, как правило, медленным изменением параметров геофизических (геохимических) полей и потому прогноз катастроф естественно строить на основе изучения характеристик различных геофизических и геохимиче-

ских полей в пространстве и во времени. Каждый вид катастрофы влияет на изменение комплекса геофизических параметров, но это влияние в количественном отношении, как правило, различно для различных геофизических полей и в различных участках одного и того же геологического района.

4. Прогноз катастроф невозможен без организованного мониторинга. Наиболее действенный экологический мониторинг раннего предупреждения можно организовать только на основе физико-химических (геохимических и геофизических) методов, которые легко поддаются стандартизации и автоматизации.

5. Одной из важнейших задач экогеомониторинга является оптимальное размещение точек наблюдений (комплексных наблюдательных станций - КНС), выбор шага временной дискретизации измерений наблюдаемых изменений геолого-геофизических параметров, их интерпретация и классификация. Надо, следовательно, правильно разместить точки наблюдений и научиться различать и классифицировать наблюденные изменения. В целом же прежде, чем приступить к организации экогеофизического мониторинга, необходимо дать ответ на следующие вопросы:

где измерять - в какой сфере и в какой точке геологической среды организовать наблюдения;

что измерять - перечень подлежащих измерению параметров геофизических полей и требуемая точность измерений;

чем измерять - требования к аппаратуре, которые обеспечили бы измерение параметров с гарантированной точностью;

как измерять - методы и технология измерений каждого параметра (в том числе режимы наблюдений, периодичность и т.п.);

когда измерять - время, наиболее благоприятное для проведения измерений.

Для ответа на все эти вопросы следует знать физические причины (явления), вызывающие катастрофы, и выбрать места, где изменения параметров геофизических полей проявляются наиболее отчетливо. Требования к выбору мест проведения измерений (полигонов) и к их оснащению должны быть составлены с учетом того, что информация только тогда будет наиболее полезна, если она характеризует состояние изменения геофизических полей на больших площадях.

6. В процессе мониторинга будет получен огромный материал, который должен быть сконцентрирован в одном центре и подвергнут глубокой и всесторонней (комплексной) обработке. Следовательно, необходимо:

- организовать сбор и хранение информации;
- разработать приемы комплексной интерпретации информации.

7. В целом концепция оптимального экогеофизического мониторинга требует решения следующих задач:

- разработка признаков экогеологического районирования;
- выбор оптимальных параметров для регистрации изменений геофизических полей в установленном экогеологическом районе;
- выбор технологии измерений (расположение КНС в пространстве, временные режимы измерений, допустимые погрешности измерений отдельных параметров);
- разработка аппаратуры, которая удовлетворяет требованиям технологии измерений и обеспечивает сбор и обработку получаемой информации;
- разработка основных принципов интерпретации получаемых данных - на основе изучения взаимосвязи изменения геофизических характеристик среды с изменением ее экогеологических параметров,
- создание центров по сбору и комплексной обработке информации.

8. На всех этапах процессов организации мониторинга большое внимание следует уделять научно-обоснованному и строго регламентированному **метрологическому обеспечению**

нию - установлению и применению научных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения требуемого качества измерений. Без этого практически невозможно проводить сравнение результатов измерений на различных полигонах даже в пределах одного и того же экогеологического района и, следовательно, интерпретировать полученные материалы, делать сколь-либо достоверные выводы, давать надежные прогнозы развития экогеологических процессов как в отдельном районе, так и, тем более, в глобальном масштабе.

Естественно, что организация мониторинга должна проводиться совместно с органами, осуществляющими санитарно-гигиенический контроль, контроль за состоянием растительного и животного мира (биологический контроль) и т.д.

9. В преамбуле к Программе сказано, что «На территории РФ сохраняется высокий уровень угрозы ЧС природного и техногенного характера и тенденция роста количества и масштабов последствий ЧС, что заставляет искать новые решения проблемы защиты населения и территорий от ЧС, предвидеть будущие угрозы, риски и опасности, развивать методы их прогноза и предупреждения». В связи с этим и изложенным выше следует признать, что утверждение Правительством РФ Федеральной целевой программы «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации» является весьма своевременной акцией.

При перечислении цели и задач Программы, в частности, отмечается необходимость создания и развития научно-методической основы управления рисками возникновения ЧС, формирования методической базы для обеспечения государственного контроля и нормирования рисков возникновения ЧС, создания и развития системы прогнозирования и мониторинга ЧС, развития системы информационного обеспечения управления рисками возникновения ЧС, разработки и внедрения передовых технологий и инженерно-технических средств для ликвидации ЧС. Решение указанных задач основано на измерении параметров, характеризующих изменение характеристик окружающей среды. В связи с большим разнообразием таких параметров и разнообразием применяемой аппаратуры, первостепенное значение должно быть уделено метрологическому обеспечению - с целью обеспечения единства и требуемой точности измерений. К сожалению, этот вопрос в Программе не нашел своего четкого отражения. К тому же, без метрологического обеспечения невозможно разработать методическую базу государственного контроля и нормирования рисков возникновения ЧС, практически невозможно создать систему мониторинга и прогнозирования ЧС и систему информационного обеспечения.

В первую очередь вопросы метрологического обеспечения должны стать составной частью следующих пунктов Программы: а) Совершенствование единой государственной автоматизированной системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций и их последствий; б) Создание сети региональных центров мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций на базе региональных центров по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий МЧС России; в) Создание и внедрение системы геоэкологического мониторинга в зонах повышенной закарстованности подработанного горного массива; г) Совершенствование и внедрение системы экологического мониторинга территорий с повышенным уровнем загрязнения окружающей среды; д) Разработка и внедрение комплекса программно-технических средств мониторинга на ядерно- и радиационно-опасных объектах; е) Создание и внедрение информационных технологий обеспечения химической безопасности населения при авариях на объектах техносферы; ж) Разработка и модернизация приборов радиационного контроля на радиоактивно-загрязненных территориях Российской Федерации.

Из сказанного следует, что решение поставленных Программой задач будет тем успешней, чем быстрее будут решены вопросы метрологического обеспечения прогноза катастро-

фических и чрезвычайных ситуаций по результатам измерений характеристик геофизических и геохимических полей. Одновременно следует обратить внимание на решение идеологических и организационных вопросов, в том числе:

1. Разработку концепции мониторинга геофизических и геохимических полей применительно к прогнозу катастрофических и чрезвычайных ситуаций и уточнение предмета «Метрология мониторинговых измерений» при прогнозе катастрофических явлений: идеология, методологии и техники экологического мониторинга в свете научных и организационных вопросов метрологического обеспечения.

2. Выработку предложений по объединению имеющихся в РФ полигонов, используемых для наблюдений за поведением геофизических полей, в единую систему мониторинга и предложения по созданию вблизи мегаполисов и крупных промышленных центров зон наблюдений - полигонов для непрерывного слежения за поведением геофизических и геохимических полей - сейсмических, акустических, магнитных, электрических, радиационных и т.д..

СНИЖЕНИЕ ПОМЕХ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДОНА КАК КРАТКОСРОЧНОГО ПРЕДВЕСТНИКА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

А.В. Климшин - Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, aklimshin@yandex.ru

Регистрация краткосрочных предвестников землетрясений возможна с помощью непрерывных измерений объемной активности (ОА) радона в почвенном воздухе. Несмотря на то, что на сегодняшний день имеется богатый экспериментальный опыт, интерпретация результатов мониторинга вызывает большие затруднения.

Для радон-мониторов, расположенных на глубине менее или равной одному метру, величина помех, вызванных вариацией метео-параметров: температуры, давления, количества осадков, а также колебанием уровня грунтовых вод, порой, оказывается большей, чем величина полезного тектонического сигнала.

Если считать, что почва представляет собой трещиновато-пористую среду, а распределение радона в почвенном воздухе удовлетворяет уравнению диффузии-конвекции, то выше перечисленные помехи (за исключением атмосферных осадков) можно представить в виде конвективных флуктуаций ОА радона около некоторого среднего значения в данной точке, характеризуемого диффузионным распределением.

Математическое моделирование позволяет выделить следующие зоны (рис. 1).

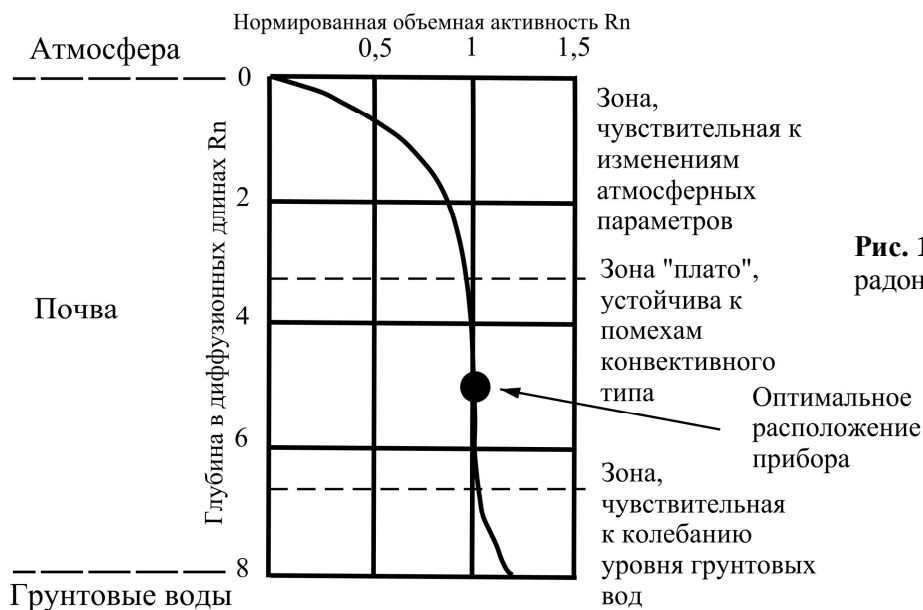


Рис. 1. Зоны чувствительности радонового монитора к помехам

Таким образом, наилучшее расположение прибора достигается в зоне «плато» - на глубине более 3-4 диффузионных длин радона. Эта зона будет существовать только в том случае, если грунтовые воды протекают не ближе пяти диффузионных длин от дневной поверхности. Поскольку измерения на глубине нескольких метров практически трудно реализовать, можно попробовать приблизить зону «плато» к поверхности почвы искусственным способом. Это достигается при использовании непроницаемого экрана.

При расположении непроницаемого экрана на дневной поверхности непосредственно под центром экрана, вблизи поверхности, возникает зона эквивалентная расположению прибора на некоторой глубине. Увеличение размеров экрана будет равносильно увеличению глубины места расположения прибора.

Использование непроницаемого экрана позволяет поднять верхнюю границу зоны «плато», что обеспечивает увеличение запаса устойчивости к помехам конвективного типа, даже при расположении прибора на поверхности почвы. Кроме того, экран является хорошей защитой от атмосферных осадков.

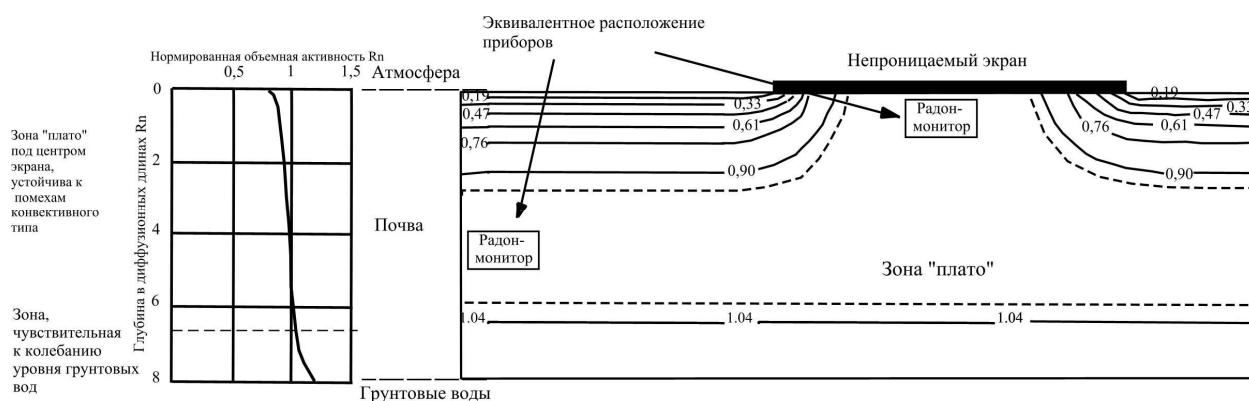


Рис. 2. Влияние непроницаемого экрана на поле ОА радона (содержание ОА радона обозначено изолиниями)

Таким образом, вышеупомянутые помехи можно снизить либо за счет правильного расположения средства измерения, с учетом диффузионных характеристик почвы, либо при использовании непроницаемого экрана.

ПЫЛЕВАЯ НАГРУЗКА И УДЕЛЬНАЯ МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ПЫЛИ В ЗОНЕ ВЫБРОСОВ ПРОИЗВОДСТВА ПО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ МЕДНОЙ РУДЫ (СЛАБОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ)

А.А. Нульман -

Институт геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург

Пылевое загрязнение воздуха – один из компонентов антропогенного воздействия на окружающую среду. Для минимизации вреда необходима информация о пространственном распределении аэрозолей, их составе и происхождении. Приземная концентрация и состав аэрозолей динамичны, поскольку зависят от многих природных и антропогенных факторов, варьирующих в пространстве и во времени [1]. Эти вариации особенно значительны в странах с горным рельефом. Поэтому получение достоверной информации на основе непосредственных анализов проб воздуха требует осреднения больших массивов данных, что делает задачу практически нереализуемой. Однако социальная значимость проблемы требует поиска возможных путей решения. В работе [2] приведены уравнения регрессии концентраций ряда металлов в выпадениях из атмосферы на снеговой покров по отношению к концентрациям в воздухе. Уравнения получены для «ряда крупных промышленных городов».

Для разных регионов они, вероятно, будут различны, в частности, за счёт влияния загрязнителей, поступающих из более высоких слоёв атмосферы вместе с осадками. Однако предложенный путь представляется наиболее продуктивным, поскольку снег является естественным «осреднителем» массы атмосферных выпадений по времени. Исследование снега даёт информацию о загрязнителях, поступающих из атмосферных потоков. Для получения информации о приземных аэрозолях в отсутствие снежного покрова кроме атмосферной следует учитывать более локальную почвенную составляющую. Данная работа посвящена исследованию атмосферной составляющей приземных аэрозолей. Эта проблема важна для планирования землепользования на различных расстояниях от действующих в настоящее время интенсивных источников аэральных выбросов, в частности, для определения размеров санитарно-защитных зон.

При оценке санитарно-гигиенического состояния окружающей среды традиционно рассматриваются концентрации химических элементов. Однако кроме химического состава важную роль играет фазовый состав, в частности, размеры, форма и физическое состояние пылевых частиц. Очевидно, что токсический эффект поступивших в живые организмы металлов зависит от структур, в составе которых они находятся, в том числе от их электрических и, по-видимому, магнитных свойств. В работе [3] предложен физический механизм взаимодействия высокочастотных магнитных полей с присутствующими в живых организмах сильномагнитными частицами. Несмотря на то, что предложенный конкретный механизм вызывает критику [4], проблема накопления в организмах сильномагнитных частиц требует серьёзного изучения.

Сильномагнитная фракция обнаруживается в аэрозолях повсеместно. Она включает естественный компонент в виде частиц сильномагнитных минералов, антропогенные обломки сильномагнитных конструкционных материалов и блестящие сферические частицы разных размеров, имеющие рыхлую внутреннюю структуру. Последние обладают низкой плотностью и перемещаются на большие расстояния от источников [5, 6]. В их составе – силикаты и различные металлы, включая тяжёлые [6]. Характерные особенности этих частиц указывают на высокотемпературное происхождение. Они могут образовываться при сгорании метеоритов, однако значительная их часть антропогенна [7]. Высокая поверхностная плотность магнитного загрязнения в зонах влияния производств, связанных с высокотемпературной переработкой минерального сырья и твёрдого топлива (см., например, [8]), показывает, что с высокой вероятностью сильномагнитные сферические частицы поступают в атмосферу в выбросах именно этих производств.

Токсический эффект от пылевого загрязнения воздуха вызывается двумя факторами: 1) высокой концентрацией аэрозолей и 2) повышенными концентрациями загрязнителей в аэрозолях. Для оценки концентрации аэрозолей в воздухе в рамках изложенного выше подхода определяется пылевая нагрузка $P = m/St$ [кг/м²-сутки], где m – масса пыли в пробе снега, S – площадь отбора пробы, t – количество дней со дня установления снежного покрова до дня отбора пробы. Для оценки концентраций элементов-загрязнителей в аэрозолях определяются концентрации загрязнителей в атмосферных выпадениях. Для оценки концентрации сильномагнитных частиц в аэрозолях определяется удельная магнитная восприимчивость атмосферных выпадений $\chi = (dM/dH)/m$ [ед. СИ·м³/кг], где dM/dH – дифференциальный магнитный момент пыли в пробе снега.

Цель данной работы – провести сравнительное исследование зимней пылевой нагрузки и удельной магнитной восприимчивости атмосферных выпадений в зоне влияния выбросов, сопровождающих высокотемпературную переработку минерального сырья, и в зоне минимального загрязнения.

Наиболее подходящей моделью для исследования загрязнения такого рода является медеплавильное производство, поскольку медь относительно слабо по сравнению, например, с железом распространена в природе и может служить индикатором загрязнения.

Работа проводилась в горно-таёжной зоне Среднего Урала. Для сравнительного исследования было выбрано два участка. Участок I расположен на Киргишанском увале на расстоянии 86 – 82 км от г. Екатеринбурга. В зимний период преобладают юго-западные ветры. Ближайшие к участку источники аэрального загрязнения: на востоке – крупный железнодорожный узел (8.5 км) и медеплавильный завод (33 км), на юге и на западе – заводы по вторичной переработке и обработке металлов (соответственно 15 км и 20 км) и передвижные источники (> 1 км).

Для исследования аэрального загрязнения была выбрана зона, в которой моноисточником является Среднеуральский медеплавильный завод. Участок II заложен западнее Шайтанского увала на территории полигона Института экологии растений и животных УрО РАН. Ближайший к заводу пункт отбора проб расположен на расстоянии 5.74 км в западном направлении в 3 км от границы санитарно-защитной зоны завода, наиболее удалённый пункт – на расстоянии 12.5 км. Экологическая диагностика показала, что территория на расстояниях 5 – 12 км к западу от завода по интенсивности загрязнения воздуха относится к буферной зоне, в которой в сообществах эпифитных лишайников отмечаются отклонения от нормального состояния [9]. Буферная зона – это зона относительно слабого загрязнения, при котором в экосистеме происходят устойчивые отклонения, но уровень этих отклонений не достигает патологического. Выбранные участки характеризовались однотипным горным рельефом и имели размеры одного порядка.

Пробы снега отбирались в небольших окнах древостоя в конце зимы. Пункты отбора проб были зафиксированы по системе GPS. На участке I заложено 7 пунктов, на участке II – 3 пункта. Одна проба имела массу 1 кг и включала 3 ÷ 12 колонок, отбираемых по мини-профилям с интервалом 1 м. Пробы оттаивались на фильтрах. Определялась масса осадка на фильтрах и дифференциальный магнитный момент фильтров с осадком. Вычислялась пылевая нагрузка P и удельная магнитная восприимчивость χ .

Размеры участков были выбраны так, чтобы в их пределах интенсивность загрязнения воздуха менялась слабо, а флуктуации параметров P и χ были вызваны природными факторами. Отбор был повторён три раза – в 2000, 2003 и 2004 годах. В 2004 г. в каждом пункте было отобрано по две пробы, которые проходили лабораторную обработку в разное время. По результатам опробования для каждого года в пределах одного участка определялись средние значения пылевой нагрузки $P_{\text{ср.}}$, удельной магнитной восприимчивости $\chi_{\text{ср}}$ и коэффициенты вариации этих параметров V_P и V_χ .

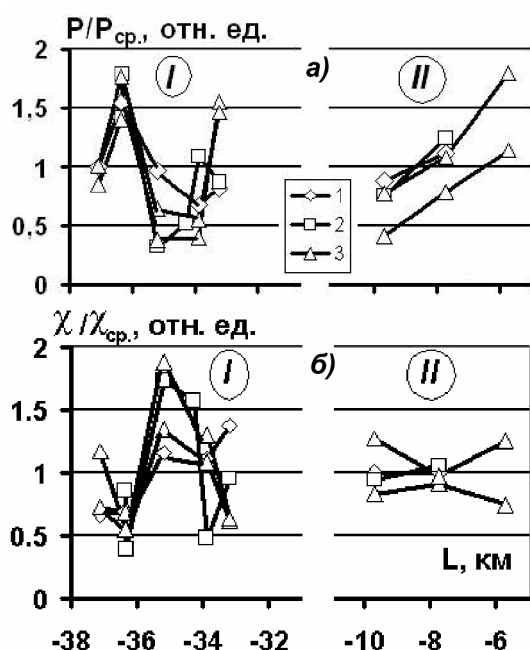


Рис. 1. Пространственные вариации параметров P и χ относительно средних значений для разных лет: а) пылевая нагрузка; б) удельная магнитная восприимчивость. I и II – номера участков. L – расстояние от источника аэраль-ных выбросов. 1 – 2000г., 2 – 2003г., 3 – 2004г.

В таблице для каждого года представлены коэффициенты вариации пылевой нагрузки и удельной магнитной восприимчивости пыли, а также соотношения между средними значениями в пределах каждого участка. Вариабельность параметра Р в обеих зонах и параметра χ в зоне минимального загрязнения практически одинакова, тогда как в буферной зоне этот показатель для параметра χ в 2.5 раза ниже, чем для параметра Р и почти в 2 раза ниже, чем для параметра χ в зоне минимального загрязнения. Средние значения χ в буферной зоне в $3.5 \div 4.6$ раза выше, чем в зоне минимального загрязнения. Средние значения параметра Р в буферной зоне на $12 \div 28$ % ниже, чем в зоне минимального загрязнения, однако вариабельность параметра превышает это понижение.

Таблица. Вариабельность параметров Р и χ в пределах каждого участка и соотношения между их средними значениями

Год отбора проб	Участок I			Участок II			$\frac{P_{cp.II}}{P_{cp.I}}$	$\frac{\chi_{cp.II}}{\chi_{cp.I}}$
	Кол-во проб	V_P	V_χ	Кол-во проб	V_P	V_χ		
2000	5	0.33	0.31	2			0.88	4.6
2003	5	0.55	0.55	2			0.67	3.5
2004	10	0.51	0.44	6	0.59	0.24	0.72	4.2

Анализ пространственных вариаций параметров Р и χ для разных лет показывает, что на участке I форма вариаций удовлетворительно совпадает из года в год, а отклонения частично обусловлены погрешностями эксперимента. Для участка II анализ менее достоверен из-за малого количества пунктов наблюдений. Однако с определённой долей вероятности можно заключить, что на этом участке вариации параметра Р для разных лет также подобны, тогда как в вариациях параметра χ в разные годы не прослеживается сходства – отклонения от среднего значения скорее носят случайный характер.

Таким образом, для пространственно-временных характеристик распределений пылевой нагрузки в зонах минимального и слабого загрязнения не обнаружено значимых различий. Величины удельной магнитной восприимчивости атмосферных выпадений в слабозагрязненной зоне меньше варьируют и в несколько раз превышают значения этого параметра для зоны минимального загрязнения.

Представленные результаты показывают, что пылевое загрязнение атмосферного воздуха, вызванное выбросами при высокотемпературной переработке медной руды и фиксируемое значимыми изменениями в экосистеме, может не проявляться в увеличении пылевой нагрузки. В то же время это загрязнение надёжно фиксируется повышенными значениями удельной магнитной восприимчивости пыли. То есть в зоне, где экодиагностика фиксирует слабое повышение загрязнённости атмосферного воздуха, не наблюдается повышенного количества атмосферных выпадений, но обнаруживается высокая концентрация сильномагнитных частиц в этих выпадениях.

Литература

1. Василенко В. Н., Назаров И. М., Фридман Ш. Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 181 с.
2. Саев Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 336 с.
3. Kobayashi A.K., Kirschvink J.L., Nesson M.H. Magnetoreception in Organisms // Nature, 1995. V. 374. P. 123.
4. Бинги В.Н., Савин А.В. Физические проблемы действия слабых магнитных полей на био-

логические системы // УФН, Т. 173. № 3. С. 265-300.

5. Шевченко В. П., Лисицын А. П., Полякова Е. И. Распределение и состав осадочного материала в снежном покрове дрейфующих льдов Арктики (пролив Фрама) // ДАН, 2002. Т. 383. № 3. С. 385-389.

6. Язиков Е. Г., Миков О. А. Способ определения загрязнённости снегового покрова техногенными компонентами. Пат. 2176406 (Россия). Опубл. 27.05.04.

7. Hunt A. The application of mineral magnetic methods to atmospheric aerosol discrimination // Phys of the Earth and Planet. Inter, 1986. V. 42. N. 1-2. P. 10-21.

8. Нульман А.А., Коптева Р.А. Информативность магнитных методов для исследования загрязнения урбанизированных территорий пылевыми соединениями металлов // Глубинное строение, геодинамика, мониторинг. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей: Третьи научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. Материалы. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2005. С. 41-42.

9. Воробейчик Е.Л., Садыков О. Ф., Фарафонов М. Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1994. 280 с.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА ЕКАТЕРИНБУРГА И ГОРОДОВ-СПУТНИКОВ

*А.В. Овчаренко¹, А.Б. Белозеров², С.В. Березина¹, Б.Б. Зобнин³, В.И. Уткин¹,
В.О. Черванев³*

¹Институт Геофизики УрО РАН, Екатеринбург, ark-ovcharenko@yandex.ru

²Росгидромет, Уральское межрегиональное территориальное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Екатеринбург

³Уральская государственная горно-геологическая академия (УГГГА), Екатеринбург

При исследовании проблемы загрязнения воздушного бассейна существует две основные задачи. Во-первых, необходимо построить для визуального экспертного анализа и управления ситуацией динамическую картину фактического распространения моно- и поли компонентных загрязнений от известных источников. Во-вторых, необходимо какими-либо методами, независимо от служб контроля предприятий-загрязнителей получать оценку мощности всех действующих источников. При этом источники могут быть как стационарными, так и нестационарными. Одной из важнейших функций внешнего контроля нестационарных источников должна быть оценка мощности кратковременных или залповых сверхнормативных выбросов с определением примерного времени и мощности выброса. Методы решения двух названных задач существенно различаются. Первая задача традиционно относится к классу, так называемых, прямых задач и исследована по основным аспектам достаточно хорошо. Вторая задача относится к классу обратных динамических задач и является существенно более сложной и менее исследованной. Для ее решения уральскими математиками разработаны новые эффективные математические методы.

На территории исследований расположены города-спутники и поселки: Первоуральск, Билимбай, Ревда, Дегтярск, Горный Щит, Арамилы, Кольцово, Березовский, Верхняя Пышма, Среднеуральск, многочисленные промышленные предприятия которых создают мощную загрязняющую нагрузку на воздушную среду. Существующая сеть мониторинга представляет информационную основу для реконструкции пространственного распределения и динамики воздушных загрязнений. Конечной целью исследований является динамическая реконструкция интенсивности источников загрязнения и создание на этой основе рекомендаций для системы управления качеством воздушной среды. Необходимо отметить, что редкая сеть станций мониторинга не позволяет непосредственно контролировать реальное состояние воздушной среды с необходимой детальностью и

оперативностью. Более того, формальное существо задачи пространственно-временной реконструкции динамики загрязнений от стационарных источников и транспортных потоков всегда требует применения специальных алгоритмов, для получения визуальной и количественной пространственной картины загрязнения. Для контроля сложной и изменчивой картины загрязнений необходимо располагать обширной дополнительной информацией и проводить мониторинг в течении определенного времени, чтобы с учетом меняющейся метеорологической ситуации накопилась достаточная информация о действующих загрязнителях. Некоторое техническое решение проблемы контроля загрязнителей может быть, конечно, достигнуто построением сети мониторинга очень высокой плотности (тотальный контроль), либо созданием и использованием специальной системы дистанционного и детального комплексного мониторинга. Важную дополнительную информацию могут дать методы выборочного активного мониторинга мобильными постами и летательными аппаратами. В качестве альтернативного и наиболее дешевого решения проблемы может быть использована математическая, а точнее компьютерная, динамическая модель загрязнения воздушного бассейна, которая опирается на относительно редкие данные существующих станций мониторинга, кадастры объектов-загрязнителей и метеорологические данные о воздушных потоках. Методы создания и использования такой модели, а также основные результаты 2005 года по ее реализации представлены в настоящей работе.

1. Информационная основа моделирования

Информационную основу моделирования составляют экспериментальные данные нескольких видов. Это данные метеорологического мониторинга скорости воздушного потока, данные мониторинга собственно загрязнений воздуха, косвенные и вспомогательные данные, характеризующие загрязнения, рельеф местности, картографические данные, эмпирические константы и т.д. Источники этих разнообразных данных, способы их вспомогательной и основной обработки существенно отличаются.

1.1. Метеорологические данные

В настоящее время метеорологический мониторинг выполняется комплексом наземных и дистанционных методов. Информация о метеорологических параметрах для исследуемого региона реально может быть получена из нескольких источников. Во-первых, это региональные службы Росгидромета, во-вторых, это сайты специализированных центров обработки метеорологических данных. В настоящей работе были использованы при моделировании данные трех метеостанций: Екатеринбург (Метеогорка), Первоуральск (станция СКАТ, территория центрального стадиона), Ревда (Привокзальный район).

Таблица. Географические координаты метеостанций, использованных при моделировании

Метеостанция	Долгота E, град.	Широта N, град.	Высота пункта, м
Екатеринбург	60.63103333 (60°37.862')	56.82633333 (56° 49.58')	270
Первоуральск (СКАТ)	E59 56.327	N56 54.268	351
Ревда	E59 55.704	N56 48.662	320

Фактические ряды наблюдений метеостанций имеют различную дискретность и отдельные окна отсутствия или брака измерений. Для совместного использования данных трех станций при моделировании выполняется вспомогательная обработка (предобработка) данных.

1.2. Мониторинг загрязнения

Мониторинг загрязнения воздуха в изучаемом регионе производится территориальными службами Росгидромета. В настоящее время мониторинг выполняется двумя видами станций (постов): а) современные автоматизированные станции типа «СКАТ», которые по-

зволяют получать информацию на компьютерных носителях полностью готовую к последующей обработке; б) стационарные наблюдательные посты (СНП) предшествующего поколения позволяют оценивать только средние загрязнения с дискретностью 5 - 6 часов. Рациональное развитие инструментальной сети мониторинга является одним из основных факторов повышения качества резульативной модели загрязнения воздушной среды и решения обратной задачи идентификации источников загрязнения.

Для городской агломерации Екатеринбурга наиболее актуальными для исследований в данное время являются проблемы загрязнения среды локальными стационарными промышленными источниками и транспортными потоками с нормативными и сверхнормативными выбросами окиси углерода CO, сернистого ангидрида SO₂, окиси азота NO и акролеина CH₂. Обширный список других загрязнителей воздуха насчитывает несколько десятков. Обычно принято изучать однокомпонентные модели загрязнений, поскольку источники загрязнений для различных компонентов существенно различаются. В настоящей работе все расчеты выполнены для загрязнения угарным газом (CO). Однако, все процедуры принципиально применимы и для комплексного показателя.

1.3. Дополнительные данные для моделирования

При моделировании загрязнения воздушной среды необходимо, как минимум, выполнить координатную привязку всех известных стационарных источников, основных транспортных магистралей, создать числовую модель рельефа местности и городской инфраструктуры, числовую модель ландшафтов, отличающихся параметрами поглощения, создать компьютерную картографическую основу для совмещения с моделью загрязнения при ее визуализации. Оценка поглощающих свойств природных ландшафтов составляет отдельную проблему и выполняется, в основном, расчетным путем.

Для учета неравномерности поглощения при численных расчетах используется схема поточечного учета свойств ландшафтов. Для исследуемой территории поглощение средой учитывается по предварительно созданной матрице свойств поглощения, которая геометрически в точности совпадает с резульативной матрицей целевых расчетных параметров. Такая матрица свойств поглощения среды создается путем дигитализации природных ландшафтов по картографическим данным. Далее такая матрица используется в расчетной схеме. В целом можно констатировать, что формирование компьютерной базы вспомогательных данных моделирования представляет важную самостоятельную задачу, которая в определенной мере влияет на окончательный резульат.

2. Физико-математическая основа моделирования

Пространственно-временная или динамическая модель переноса и накопления загрязнения воздушной среды городской агломерации Екатеринбурга строится в несколько этапов с учетом следующих основных факторов и принципов.

А) Основными источниками загрязнения воздушной среды являются промышленные и муниципальные предприятия, свалки мусора, горные отвалы и зольные склады, отдельные сельскохозяйственные предприятия, тепловые электростанции, автомобильный транспорт (транспортные потоки), в зимний сезон - котельные и печи частного сектора, в летний сезон - спорадические лесные пожары, транс региональные (дальне приносные) потоки загрязнения. Создание полного каталога этих источников загрязнения, оценка мощности всех источников, координатная привязка, определение и контроль нормативных выбросов является важнейшими и необходимыми частными задачами разработки модели.

Б) При разработке модели воздушных загрязнений используется понятие прямой и обратной задачи распространения загрязнений. Прямая задача подразумевает изучение процесса распространения загрязнения от стационарных источников с известным расположением и известной мощностью. Обратная задача, в данной работе, решается для источников с известным расположением и неизвестной мощностью выбросов. Мощность выбросов каждого источника должна быть, по возможности, определена независимо от муниципального

каталога по данным фактического мониторинга. Обратная задача может быть поставлена для стационарных во времени источников, а путем решения серии обратных задач для различных периодов может быть оценена и нестационарность источников.

2.1. Решение прямой задачи динамики распространения загрязнения

Формальной физико-математической основой моделирования для прямой задачи являются уравнение непрерывности потока загрязнения, уравнение движения Эйлера для воздушной среды, уравнение состояния среды и ряд краевых или граничных условий.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \text{div}(C\vec{V}) &= f \\ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}, \text{grad})\vec{V} + \frac{1}{\rho} \text{grad}P &= 0 \\ P\rho^{-\chi} &= \text{const}, \quad \chi = \frac{c_p}{c_v} \end{aligned} \quad (1)$$

где \vec{V} - вектор скорости движения воздушной среды, который подчиняется уравнению во второй строке (1). Скорость движения воздушной среды изучается экспериментально путем наблюдений на сети метеорологических станций и постов; $C(x, t)$ - концентрация изучаемого компонента загрязнения; $\rho(x, t)$ - плотность воздушной среды; $P(x, t)$ - давление, $f(x, t)$ - интенсивность источников загрязнения, в данном случае функция включает также разное поглощение загрязнения средой, c_p, c_v - удельные теплоемкости газа, соответственно, при постоянном давлении и постоянном объеме.

Граничные условия обычно принимаются как

$$\left. \frac{\partial C(x, t)}{\partial n} \right|_{\bar{A}} = 0 \quad (2)$$

При этом область изучения распространения загрязнения ограничена поверхностью, которая образована снизу рельефом местности, сверху априорно выбранным уровнем, а с боков - вертикальными плоскостями. Для верхнего уровня концентрация загрязнения пренебрежимо мала (или на нем обеспечиваются условия изоляции слоя). На удаленных от источников боковых вертикальных гранях исследуемой области при отсутствии трансграничного переноса можно принять это же условие. С учетом технической реализуемости, в настоящее время можно строить модели на сетках дискретностью 0.2 - 0.5 километров. Часто при моделировании ограничиваются изучением двумерного (x, y) случая. Ниже, для первого этапа работы, также ограничимся этим случаем.

Уравнение движения Эйлера при создании модели загрязнения может быть использовано как инструмент пространственного изучения скорости воздушного потока. Сложный процесс динамики воздушного потока можно моделировать для всех или отдельных компонентов скорости или же использовать для расчетов данные, целиком полученные на основе фактических наблюдений по сети метеостанций и постов. На практике приходится пользоваться комбинированным подходом, заменяя отсутствующие данные мониторинга вертикальной компоненты скорости воздушного потока расчетными данными. Для этого приходится ставить и численно решать специальные краевые задачи.

Дифференциальное уравнение переноса примеси, первая строка уравнений (1), в скалярной форме с детализацией структуры источников можно записать в следующей форме:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} - w \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial C}{\partial z} \right) + F + R - P - W, \quad (3)$$

где F - интенсивность источников загрязнения; R - скорость образования загрязнения за

счет химических реакций; P - скорость уничтожения загрязнения за счет химических реакций; W - скорость выпадения примеси на подстилающую поверхность; C - объемная концентрация загрязнения; u, v, w - компоненты скорости ветра; k - коэффициент атмосферной турбулентности или диффузии.

Граничные условия детализируются в виде:

$$\begin{aligned} \text{при } z = H_{\max} \quad C = 0 \quad \text{или} \quad k \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \\ \text{при } z = 0 \quad k \frac{\partial C}{\partial z} + wC = \beta C \end{aligned} \quad (4)$$

где β – коэффициент аккомодации или поглощения на поверхности осаждения (зависит от характера поверхности, например, лес, водоем, поле, застройки различной этажности и др.). На первом этапе исследований этот коэффициент был принят постоянным и равным 0.05, то есть было принято условие, что 5 % всех загрязнений непрерывно поглощается средой. На данном этапе исследований 2005 года структура неоднородного поглощения учитывалась матрицей $\beta(x, y)$, которая была создана путем дигитализации карт ландшафтов и данных таблицы.

В приближении двумерной (x, y) задачи переноса и постоянном коэффициенте диффузии k , а также без учета R, P основное уравнение можно записать

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \beta C + F, \quad (5)$$

К этому уравнению на достаточно малых сетках по (x, y, t) применим метод простых итераций. При известных функциях скорости ветра $V = (u, v)$, мощности действующих стационарных источников $F(x, y, t)$ и параметрах k, β этот метод сходится достаточно быстро

$$C^{(n+1)} = \Delta t \left[-u \frac{\partial C^{(n)}}{\partial x} - v \frac{\partial C^{(n)}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial C^{(n)}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial C^{(n)}}{\partial y} \right) - \beta C^{(n)} + F \right] \quad (6)$$

Отметим, что здесь шаг по времени Δt может не совпадать с временным интервалом, применяемым для визуализации отдельных сцен, и должен быть намного меньше.

В 2005 году при моделировании в уравнениях (5 - 6) использованы непрерывные поглощающие источники 0 - 8 % различные по площади. Кроме этого, компоненты скорости переноса вычислялись на основе данных мониторинга тремя метеостанциями.

Для расчета пространственно-временного распределения вектора скорости ветра использовались данные метеостанций Екатеринбург, Ревды и метеопоста в Первоуральске, который был совмещен со станцией СКАТ.

Для вычисления компонентов (V_x, V_y) скорости ветра \vec{V} в произвольных пунктах расчетной сетки применялась схема линейной интерполяции по времени для каждого пункта и затем нелинейной интерполяции по пространству по всем станциям мониторинга. Проблема интерполяции по времени возникает из-за несинхронного мониторинга на разных станциях (20 минут для СКАТ и 5 - 6 часов для постов) и отсутствия наблюдений в отдельные моменты времени (сбой аппаратуры и брак наблюдений).

Линейная интерполяция параметров ветровой модели по времени выполнялась по формулам (7)

$$V(t) = V(t_1) + \frac{V(t_2) - V(t_1)}{t_2 - t_1} (t - t_1), \quad (7)$$

где t_1, t_2 – ближайšie моменты фактических измерений к изучаемому моменту времени, $t_1 < t_2$, $|t_2 - t_1| < dt$. При больших окнах отсутствия или брака данных выполняется нелинейная весовая интерполяция в скользящем окне.

$$V(t) = \frac{\sum_{i=1}^n V(t_i)P(t_i)}{\sum_{i=1}^n P(t_i)} \quad (8)$$

При этом вес исправной точки выбирается как

$$P(t_i) = \frac{1}{(t - t_i)^m} \quad (9)$$

Размер окна осреднения не менее трех исправных точек.

Поскольку фактически фиксировались значения модуля скорости ветра и азимут с конечной точностью 2 м и 10 градусов, то после интерполяции может быть выполнена рандомизация с этими дисперсиями. Нелинейная интерполяция по пространству производилась по формулам (8)

$$\begin{aligned} V(j) &= V_{cp} + \sum_{i=1}^n \frac{(V_i - V_{cp})}{r_{ij}^2} \\ Az(j) &= Az_{cp} + \sum_{i=1}^n \frac{(Az_i - Az_{cp})}{r_{ij}^2} \end{aligned} \quad (10)$$

где j - произвольный пункт (x_j, y_j) , в котором вычисляются интерполируемые параметры, V_{cp}, Az_{cp} - средние значения модуля скорости и азимута ветра по пунктам мониторинга (x_i, y_i) , r_{ij} - расстояние между пунктами (x_j, y_j) и (x_i, y_i) .

Исследование сходимости расчетных схем показало, что шаг сетки по времени при расчетах должен составлять порядка 10 минут (24 x 6 = 144 сцен в сутки). Для визуализации же результатов расчета достаточно использовать 1 сцену в час. Для более грубых представлений можно выполнять визуализацию расчетов 1 - 2 - 4 раза в сутки. Был исследован период времени 1.01.2005 - 15.10.2005 (около 300 суток).

Дискретность времени отсчета составила 10 мин, чему соответствует за данный период 43200 сцен воздушного потока. При расчетах были приняты меры для максимального сокращения вычислительных операций: а) линейная интерполяция по параметру времени; б) нелинейная пространственная интерполяция параметров для фиксированных станций (матрицы и средние значения интерполируемых параметров).

Принятые схемы интерполяции позволяют эффективно вычислять сглаженную модель фактического ветрового потока на любых расчетных сетках при любом числе действующих в данный момент метеостанциях.

Вопрос о выборе коэффициента k диффузионного рассеяния в формулах (3, 5, 6) решается на основе анализа дистанционных космических снимков различного разрешения и численных экспериментов по расчету модели. В целом, вопрос о выборе фактических параметров рассеяния и поглощения средой остается в данное время открытым и требует дальнейшего изучения и уточнения особенно в части сезонных вариаций.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ И ЕЕ РОЛЬ ПРИ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

И.М. Хайкович¹, В.В. Куриленко² -

¹ВИРГ - Рудгеофизика; С-Петербург

²С-Петербургский университет, Институт земной коры

Основное назначение специалистов-экологов заключается не только в фиксации экологического состояния окружающей среды, но и в умении прогнозировать и управлять техногенными процессами - в первую очередь процессами антропогенного характера, которые могут приводить к осложнению экологической обстановки. Сложность заключается в том, что в ряде случаев прогноз необходимо строить тогда, когда деятельность человека происходит в условиях сложных и практически непредсказуемых природных процессов.

В последние годы в экологии наблюдается заметное увеличение числа теоретических исследований и усиление их значения. Большое влияние на экологию как науку оказали достижения математики, физики, химии. В свою очередь экология выдвигает перед этими науками новые задачи. Математическую дисциплину, предметом которой являются математические модели экологических объектов и процессов и методы их исследования, можно назвать *математической экологией*. Основной вопрос, который в первую очередь должна решить математическая экология - это построение *математической модели* экологических процессов и объектов на основе общих представлений о том, с чего должно начинаться построение таких моделей, из каких принципов следует исходить при их построении, в чем основное содержание математической модели и т.д.

Математическое моделирование является основным средством анализа и прогноза в тех случаях, когда прямой эксперимент можно провести лишь один раз, а последствия эксперимента могут привести к необратимым последствиям. Особенно важна роль математического моделирования при исследовании крупномасштабных экологических проектов и проблем. Изучение математических моделей можно рассматривать как «модельный эксперимент», который позволяет изучать такие объекты, прямой эксперимент над которыми затруднен или эмпирически нецелесообразен, или же вообще невозможен. Как, например, эмпирически оценить экологические (климатические) последствия такого «проекта», как поворот Сибирских рек?

Возрастающее значение математического (а точнее физико-математического) моделирования в естествознании, как одного из эффективных средств познания строения и закономерностей развития явлений материального мира, обусловлено двумя особенностями. Во-первых, принципы моделирования определяют необходимость использования и совершенствования общеметодологического подхода к раскрытию сущности явления, а во-вторых - конкретные средства и разновидности физико-математического моделирования настолько разнообразны, что допускают раскрытие отдельных сторон объекта или процесса в «идеальных», не осложненных помехами, условиях. В настоящее время трудно найти отрасль науки, где бы не использовались принципы моделирования для исследования закономерностей изучаемых процессов и явлений. Методы математического моделирования – важнейшее средство исследовательской деятельности на современном этапе развития, а создание математических моделей - основное направление современного процесса математизации наук.

Методы математического моделирования в геофизике получили развитие во второй половине 20-го века при изучении процессов в атмосфере, гидросфере и биосфере. С помощью этих методов получены, например, важные и интересные материалы по формированию радиоактивных полей и аномалий, которые дают материал для изучения эволюции естественной радиоактивности на земном шаре и ее влияния на становление жизни на Земле и т.д. В последнее время у специалистов наблюдается стремление - освоить и применить в своих областях опыт, накопленный математиками. Но это не может происходить формально, без учета специфики и опыта в каждой области.

Приоритет использования математического моделирования для решения геологических задач принадлежит геофизикам, которые стали использовать модельные представления с момента зарождения геофизических методов в геологии, а именно, с 20-х годов прошлого столетия. Пример - понятие возмущающего объекта как некий объем геологического пространства, ответственного за формирование «аномальной» составляющей физического поля. Это понятие было положено в основу расчета ожидаемых аномальных эффектов и широко используется в настоящее время. Расчеты «аномалий» помогают корректировать представления о реальных источниках и причинах формирования тех или иных явлений. Внедрению методов моделирования широко способствовало повсеместное использование вычислительной техники. Построение моделей связано с использованием разнообразных математических методов и способов обработки и интерпретации. В большинстве случаев по-

строить математическую модель и проанализировать ее возможности, в приемлемые для практических нужд сроки, практически невозможно без применения современного математического аппарата и вычислительной техники.

Большой вклад в становление и развитие моделирования и его применении при решении широкого круга геологических задач внесли представители Иркутской школы во главе с проф. Г.С. Вахромеевым, который впервые сформулировал понятие физико-геологической модели (ФГМ) объекта геофизического изучения - как «систему абстрактных возмущающих тел, которая аппроксимирует естественный объект с необходимой для моделирования этого объекта детальностью и отражает структуру, размеры, форму, физические параметры (свойства) и соответствующее им распределение физических (геофизических, геохимических) полей, которые, в свою очередь, отражают аномальные характеристики (функции) объекта». Это определение является одинаково пригодным для аппроксимации любого блока земной коры, нефтегазовой структуры, рудного поля, месторождения, разновидности геологических пород и любых структур, представляющих интерес для исследователя. Аналогично можно определить «физико-экологическую модель геологического объекта» (ФЭМ) как *систему абстрактных возмущающих тел, аппроксимирующих естественные объекты применительно к оценке экогеологической обстановки*. В такой формулировке ФЭМ объекта отражает взаимосвязь свойств моделируемого геологического объекта с регистрируемыми в его окрестности геофизическими и геохимическими полями, которые в той или иной степени влияют на экологическую обстановку объекта.

Для описания и построения математических моделей используют класс таких абстрактных объектов как числа, векторы и отношения между этими объектами. И задача специалиста - установить правила соответствия, связывающие исследуемые характеристики (параметры) физических объектов с определенными математическими объектами и их отношениями. Только в этом случае построенная математическая модель будет подходящим образом воспроизводить интересующие исследователя аспекты физической ситуации. В основе практически всех принципов построения математической модели обычно лежит закон сохранения (сохранение баланса) – как основа любой физической модели. По своей сути это есть не что иное, как законы сохранения масс и энергии. Сама же *математическая модель – это упрощенная версия реального мира, выраженная с помощью математических символов*. Очевидно, что при построении математической модели следует, прежде всего, из общего числа мыслимо допустимых характеристик объектов и процессов выделять те, которые являются реально определяющими. Математические модели, которые дают максимально подробное описание сложных экосистем, называют *имитационными*. В отличие от них, *качественная* математическая модель должна учитывать как можно меньше второстепенных деталей. Качественные модели позволяют выявлять общие экологические закономерности, вскрывать основные механизмы (факторы), управляющие развитием экосистем, определяют запреты, которые нельзя нарушать при имитационном описании всей экосистемы или отдельных ее подсистем.

Перевод большинства экологических задач на математический язык достаточно труден. Это связано с тем, что экологические процессы с точки зрения формализма менее изучены, чем, например, физические или химические. В то же время, метод математического моделирования представляет собой мощный инструмент количественного и качественного анализа и оценки изменений характеристик окружающей среды под воздействием различных природных и, что особенно важно – техногенных факторов. И если математическая модель достаточно точно имитирует действительность, сохраняя основную структуру реального процесса или явления, то мы получаем неограниченные возможности для экспериментирования – путем, например, введения новых факторов и исследования их влияния на изучаемую систему.

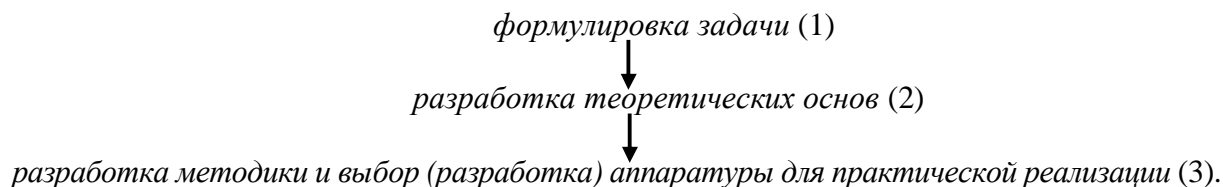
Математические модели в экологии полезны тогда, когда они объясняют что-то непо-

нятное, предсказывают возможные пути развития экосистем и условия, при которых будет обеспечена как устойчивость самой экосистемы, так и ОС, или же подсказывают постановку и проведение новых экспериментов.

Формированию математической модели неизбежно предшествует формирование физической (физико-экологической) модели, которая адекватно отражает процесс формирования экологической обстановки. Такая ФЭМ является концептуальной и отражает представление исследователя о физико-геологических особенностях (о механизме) процесса. Построенная на ее основе математическая модель дает описание физического процесса с помощью математических символов - в виде систем дифференциальных (интегро-дифференциальных) или алгебраических уравнений. Естественно, что математическая модель зависит от степени и полноты формализованности процесса и знаний о параметрах, описывающих процесс. Обе модели (физико-экологическая и математическая) взаимодополняют друг друга и представляют собой, по существу, две стороны процесса математического моделирования в экологической геологии. В частности, такой подход в случае, если наблюдаемое поле существенно отличается от модельного, позволяет уточнять и дополнять как содержательную сторону ФЭМ (концепцию), так и ее математическую формулировку. Однако при построении физико-математических моделей следует иметь в виду немаловажную особенность: в отличие от физического эксперимента, когда можно «управлять» исходными параметрами, в экогеологии приходится иметь дело со случайными величинами, результат количественной оценки которых во многом зависит от подхода (и искусства) исследователя (экспериментатора) к изучаемому событию (явлению). В этих условиях получение объективных данных методами математического моделирования представляет собой весьма важную задачу.

В экогеологии, когда речь не идет об исследовании тонких физических процессов, во многих случаях достаточно изучить основные закономерности поведения геофизических и др. полей в условиях, максимально приближенных к условиям измерений в полевых условиях и более или менее адекватно отражающих эти условия. Поэтому при выборе ФЭМ обычно исходят из определенных идеализированных представлений о природе явлений, а при построении математической модели – из возможности ее достаточно быстрого исследования с помощью современных методов математической физики и вычислительной техники. При этом, очевидно, нет необходимости стремиться построить математическую модель, точно воспроизводящую физический процесс, поскольку в принципе невозможно учесть все особенности природных объектов. Речь может идти о выявлении основных закономерностей в условиях, свободных от влияния мешающих факторов. Последнее весьма существенно, поскольку любой физический эксперимент в той или иной мере осложнен мешающими факторами.

Моделирование в экогеологии играет важную роль в технологическом процессе (в технологии) исследования экогеологической обстановки. В соответствии с принятой в настоящее время методологией формирование технологического процесса обычно проходит через три стадии:



В соответствии с этой последовательностью ФЭМ, воспроизводящую физическое поле, адекватное исследуемому (геофизическому, геохимическому и т.д.) полю реальных объектов, следует сформировать на первой стадии при формулировке задачи. На практике исходным пунктом является обычно эмпирическая ситуация, которая ставит перед исследователем «задачу», на которую следует дать «ответ». Например, как скажется на окружающей среде разработка месторождения, строительство АЭС и т.п. При этом реальные ситуации редко бывают

четко охарактеризованы, а сложные взаимодействия и процессы в окружающей среде делают точное описание весьма затруднительным. Для физического явления процесс схематизации (или идеализации) играет решающую роль, поскольку в реальном процессе участвует множество факторов. Физическая модель отражает наши представления о формировании экологического пространства и характеризующих это пространство параметрах.

Теоретическое осмысление физической модели, проводимое на второй стадии, находит свое отражение в математическом моделировании. Процесс математического моделирования можно условно разделить на моделирование физического процесса и моделирование процесса измерений. Самая трудная задача в процессе моделирования – это перевод наиболее важных, выявленных в процессе анализа, явлений или факторов на язык математических понятий и постулирование или обоснование связей между ними. Всегда надо помнить, что математическая модель представляет собой упрощение реальной ситуации. Но в этом упрощении следует опускаться только до определенного предела, когда несущественные признаки отбрасываются, а исходная ситуация сводится к идеализированной задаче, поддающейся математическому анализу.

Важное решение, которое надо принять в самом начале моделирования, относится к природе математических переменных. По существу эти переменные делятся на два класса. В один класс входят т.н. детерминистские переменные, которые поддаются (хотя бы теоретически) точному измерению, а во второй – т.н. стохастические, которые никогда не могут быть точно измерены и носят случайный характер. При постановке методов исследования экологической обстановки исследователь должен иметь четкое представление о том, какую информацию несет тот или иной параметр в условиях, не осложненных помехами, какую нагрузку создает исследуемая характеристика (например, ионизирующее излучение) на окружающую среду (на живую природу). Это позволит прогнозировать изменение геофизических параметров при изменении состава и свойств среды.

Таким образом, в основе формирования математической модели лежит ФЭМ, и даже в простейших случаях математическая модель не может быть сконструирована без опоры на ФЭМ, более или менее адекватно отражающую действительность.

Анализ природных процессов с научной точки зрения представляет собой постановку и решение определенной серии задач, способствующих расшифровке этих процессов с целью возможного предсказания дальнейшего его развития. Сам процесс моделирования состоит из шести этапов:

- выбор физической модели, наиболее адекватно отражающей физический процесс (физическое моделирование);
- математическое описание физического процесса в виде системы уравнений и граничных условий (математическое моделирование);
- анализ математической модели с целью выявления параметров, описывающих физический процесс;
- исследование математической задачи (решение) с целью установления зависимостей физических полей от параметров, характеризующих эти поля, и от начальных и граничных условий;
- проверка адекватности математической модели на основе критерия практики – путем сопоставления результатов расчетов с реальной ситуацией, и при необходимости – уточнение модели;
- использование результатов математического моделирования для прогноза.

Из сказанного следует, что важную роль в анализе природных процессов играет понятие «математическая модель» – как математическое описание реальных процессов, помогающее проводить анализ этих процессов и делать предсказания. Математическая модель – это по существу упрощенная версия реального мира, выраженная с помощью математических символов. Если модель с достаточным приближением имитирует действительность, то

с ее помощью можно проигрывать различные ситуации, изменяя параметры модели и вводя в нее новые параметры. Это позволит предсказывать развитие исследуемого процесса и выявлять условия, при которых процесс будет развиваться в нужном направлении и, что очень важно – в отсутствии мешающих факторов.

Таким образом, математическая модель:

- устанавливает наиболее вероятные соотношения между исследуемыми величинами;
- позволяет выявить наиболее существенные характеристики процесса, отбросив несущественные;
- позволяет осуществить прогноз.

Для математического моделирования экологических объектов, процессов и явлений применяют два подхода – *детерминистский* и *стохастический* (статистический), в соответствии с чем различные модели процессов можно разделить на две категории:

1. *детерминистские* (детерминированные) модели, в которых каждая переменная или параметр могут принимать определенные фиксированные (или ряд фиксированных) значений,

2. *статистические* (вероятностные или стохастические) модели, в которых переменные и параметры, используемые для описания связей между входом и выходом, а также структура этих связей, точно не известны.

Если обозначить через $x(t)$ [$y(t)$, $z(t)$...] конкретное значение физической величины, а через $X(t)$ [$Y(t)$, $Z(t)$,...] - возможные исходы этой величины, то представление о потоках информации в детерминированных моделях и в статистических (когда детерминированная модель содержит случайные параметры или исходная модель носит статистический характер), можно получить из рис. 1.



Рис. 1. Схематическое изображение формирования детерминированных и статистических моделей

Детерминистские модели учитывают основные характеристики моделируемых явлений и позволяют выявить долговременную тенденцию их развития, в то время как стохастические модели в состоянии учесть случайные флуктуации в этой тенденции и оценить вероятность их проявления.

Преимущество при экологических исследованиях детерминистского моделирования связано с тем, что такие модели удобнее и во многих случаях позволяют с помощью методов математической физики (которые достаточно хорошо разработаны) описать основные физические (геофизические) закономерности. Детерминистские модели (их иногда называют «модели явлений переноса» или «модели состояния») основаны на идеологии законов сохранения (или на физических (физико-химических) принципах), их формулировка требует большой априорной информации, а для их описания используют дифференциальные (интегральные или интегро-дифференциальные) уравнения или системы уравнений и граничных условий, которые отражают физические (петрофизические) и морфологические свойства объекта. Последующее решение этих уравнений позволяет выявить аномальные эффекты, дать прогноз экологической обстановки и принять соответствующие меры по ло-

кализации и/или ликвидации негативных явлений. По существу детерминистская модель – это «эксперимент в отсутствие помех».

Статистические модели требуют меньшего объема априорной информации; их используют в основном для анализа экспериментальных данных. Такие модели носят сугубо эмпирический характер и при их построении широко используются приемы статистического анализа. Преимущество работы со статистической моделью в сравнении с исследованием непосредственно экспериментальных данных заключается в том, что исследователь может проследить за ходом процесса в области изменения переменных и оценить влияние на процесс изменения отдельных переменных, когда погрешности этих измерений определенным образом «нивелированы».

Результаты статистического моделирования могут быть, в свою очередь, использованы для установления (или уточнения) ФЭМ (или ФГМ) и построения на ее основе математической модели, а детерминистская модель может быть переведена в категорию стохастической модели, если используемые для ее составления дифференциальные (интегральные или интегро-дифференциальные) уравнения или системы уравнений и граничных условий содержат случайные коэффициенты.

Различают модели с установившимся состоянием, когда в математической модели отсутствуют производные переменных от времени. Их иногда квалифицируют как стационарные, в отличие от моделей, описывающих нестационарное состояние.

Для построения моделей и их анализа используют различные разделы прикладной математики – в основном методы математической физики и математической статистики. Использование аппарата математической физики обусловлено тем, что с его помощью можно решать широкий круг задач, описывающих состояние объектов исследования системами дифференциальных (интегро-дифференциальных) уравнений. Методы математической физики позволяют получить решение в аналитическом виде, которое (что очень важно!) легко поддается исследованию. Использование методов математической статистики (статистическое оценивание, проверка гипотез, регрессионный, факторный и кластерный анализы) обусловлено самой природой изучаемых событий, которые носят случайный характер и для исследования которых применяют в основном результаты эксперимента.

РОЛЬ ДИСПЕРСНОСТИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В ФОРМИРОВАНИИ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

М.Я. Чеботина, Л.М. Щербакова, Р.П. Пономарева -

Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург

Одним из основных источников образования радиоактивных аэрозолей являются предприятия атомной промышленности и энергетики. Определяющим параметром при оценке распространения этих аэрозолей в окружающей среде и накопление в организме человека является их дисперсность, то есть характеристика аэрозольных частиц по размеру и радиоактивности.

В первые годы изучения дисперсности радиоактивных аэрозолей в воздухе рабочих помещений измерения их размеров производили оптическим методом. При этом видимые в оптическом микроскопе частицы диаметром $> 0,3$ мкм принимали за грубую фракцию, а невидимые частицы $< 0,3$ мкм - за мелкую фракцию. Далее был разработан оптикордиографический метод и введена классификация частиц по величине АМАД. Термин АМАД означает активный медианный аэродинамический диаметр, учитывающий размер, плотность и радиоактивность аэрозолей. По этому параметру аэрозольные частицы были разделены на мелкодисперсную (МДФ, меньше 1 мкм), среднедисперсную (СДФ, 1 - 20 мкм) и крупнодисперсную (КДФ, больше 20 мкм) фракции.

В воздухе рабочих помещений предприятий атомной промышленности содержание раз-

личных по дисперсности фракций аэрозолей зависит от особенностей технологического процесса и характера рабочих операций. В частности, в период с 1971 по 1979 гг. относительное содержание МДФ на плутониевом производстве ПО «Маяк» при нормальном режиме эксплуатации постепенно повышалось и к 1980 г. достигло 80 - 90 % от суммарного содержания всех фракций. В то же время вклад СДФ аэрозолей снижался с 80 до 5 %, а КДФ составлял всего 1 - 2 %. В 1999 г. вклад мелкодисперсной фракции приближался к 100 %. При этом радиоактивность частиц КДФ на 1 - 2 порядка величин превышала таковую частиц МДФ, а удельная активность частиц МДФ была на 5 - 8 порядков величин выше, чем СДФ и КДФ. Удельная активность аэрозолей МДФ для конкретного производства является величиной практически постоянной и близкой к удельной активности продукта, тогда как удельная активность СДФ и КДФ меняется в пределах нескольких порядков величин в зависимости от видов производимых работ. Таким образом, в воздухе рабочих помещений ПО «Маяк» одновременно присутствуют аэрозоли, имеющие различные диапазоны размеров и радиоактивности частиц. Поскольку частицы МДФ преобладают по количеству и удельной активности, можно заключить, что они являются тем фоном радиоактивных аэрозолей, которые формируются в рабочих помещениях данного предприятия [1, 2].

Из рабочих помещений радиоактивные аэрозоли проходят в вентиляционные и очистительные установки, в которых задерживаются частицы КДФ и относительно более крупные частицы СДФ; аэрозоли МДФ проходят через системы очистки и попадают в окружающую воздушную среду. Анализ научной литературы по дисперсности радиоактивных аэрозолей в выбросах предприятий атомной промышленности при штатном режиме работы (Белоярская АЭС, Чернобыльская АЭС до аварии, завод по регенерации топлива в США и др.) показал, что размеры этих частиц в основном лежат в интервале 0,01 - 1 мкм, что соответствует МДФ аэрозолей. В аэрозолях этой фракции в разных местах наблюдений обнаружены радионуклиды плутония, ^{131}J , ^{51}Xe , $^{134,137}\text{Cs}$, ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{65}Zn и др. [3 - 7].

В случае аварийных выбросов диапазон размеров аэрозольных частиц в них значительно больше, чем при нормальной эксплуатации атомных предприятий. В частности, в факеле Чернобыльского выброса при аварии 1986 г. был обнаружен широкий спектр размеров частиц, включающий и КДФ. Это связано с выделением в воздух при разрушении кладки реактора в момент аварии крупных «горячих» частиц ядерного топлива, которые отсутствуют при нормальной эксплуатации. Значительную часть аэрозолей составляли частицы МДФ и СДФ фракций, которые были весьма подвижны и в 1986 г. достигли территории Украины, Белоруссии, многих Европейских стран, Японии, США, Англии и других удаленных от аварии стран мира [8 - 11].

Радиоактивные частицы, поступившие в воздушную среду с выбросами предприятий атомной промышленности, формируют радиоактивный фон в приземном слое атмосферного воздуха. С течением времени они претерпевают изменения в размерах. В том случае, когда температура отходящих газов велика, по мере попадания в атмосферный воздух происходит разрыв частиц от воздействия содержащихся в них газов и распад на более мелкие частицы размером до 1 мкм. С другой стороны, в атмосферном воздухе происходит также их укрупнение за счет коагуляции и агрегации [12 - 13].

Установлено, что в целом с увеличением диаметра аэрозольных частиц в воздухе их радиоактивность возрастает, в то время как число этих частиц уменьшается [14, 15]. Эта закономерность, очевидно, не будет распространяться на «горячие» частицы МДФ и СДФ при аварийных взрывах, например на Чернобыльской АЭС.

В приземном слое воздуха вблизи предприятий атомной промышленности, работающих в штатном режиме, за период с 1972 по 2005 гг. основной вклад в величину объемной активности воздуха в большинстве случаев вносили аэрозоли МДФ. Однако на некоторых территориях заметный вклад вносят также частицы СДФ. В ряде случаев это может быть следствием движения автотранспорта, сельскохозяйственных работ, близости других источ-

ников выбросов радиоактивных и любых других аэрозолей техногенного происхождения, которые могут быть носителями радиоактивных частиц, ветрового переноса с других территорий и т.д. [2, 7, 15 - 21 и др.].

Согласно имеющимся литературным данным, до аварии на Чернобыльской АЭС в приземном слое воздуха стран Центральной Европы, Англии, США, Японии, Украины присутствовали радиоактивные аэрозоли преимущественно МДФ [10, 11]. Сразу после аварии в приземном воздухе на расстоянии 5 км от ЧАЭС также были обнаружены в основном радиоактивные аэрозоли МДФ. Однако уже через год в большинстве обследованных точек наблюдения в пределах 80 км зоны обнаруживались преимущественно частицы СДФ размером до 8,7 мкм. Авторы, исследовавшие этот феномен, считают, что СДФ в приземном слое воздуха в это время сформировалась за счет вторичного подъема в воздух частиц почвы, сильно загрязненной радионуклидами в результате аварии [9, 22 - 24 и др.].

Основным депо нахождения большинства радионуклидов в природной среде является почва. Она же является источником вторичного загрязнения приземного слоя воздуха. Почва, как и воздух, представляет собой полидисперсную систему и состоит из частиц разной степени крупности [13]. Имеются сведения, что большая часть радиоактивности в почве приходится на самые крупные и самые мелкие по гранулометрическому составу частицы [25]. Кроме того замечено, что с увеличением расстояния от источника загрязнения вклад вторичных аэрозолей мелкодисперсной фракции, поднятых с почвы, и их удельная активность увеличиваются по отношению к среднедисперсной фракции [24].

На примере плутония показано, что основными механизмами его миграции по глубине почвенного профиля является перенос с мелкодисперсными коллоидными частицами, конвективный перенос с током влаги под действием градиента температур и диффузия [26], а основным механизмом формирования концентраций радионуклида в воздухе является ресуспензия, т.е. вторичный подъем в воздух частиц с загрязненной почвы [6]. Величина ресуспензии определяется многими факторами, основным из которых является плотность загрязнения почвы.

На большом массиве фактических данных разных стран мира по загрязнению почв и воздуха плутонием для территорий, загрязненных глобальными выпадениями и выпадениями от испытаний ядерного оружия, установлено, что коэффициенты ресуспензии ($k_{\text{рес}}$ представляет собой отношение плотности загрязнения почвы данным радионуклидом, $\text{Бк}/\text{м}^2$, к концентрации радионуклида в воздухе, $\text{Бк}/\text{м}^3$) обратно пропорциональны плотности загрязнения почвы. В интервале плотностей загрязнения в пять порядков величин (от 7 до $1000000 \text{ Бк}/\text{м}^2$) коэффициенты ресуспензии снижаются всего в 2000 раз [27]. На наш взгляд, это обусловлено тем, что с уменьшением плотности загрязнения почвы вклад МДФ в загрязнение воздуха возрастает. Это равносильно тому, что с увеличением расстояния от источника загрязнения воздушная пыль обогащается радионуклидом за счет увеличения количества и удельной активности МДФ.

Обогащение воздуха аэрозолями МДФ имеет большое значение при поступлении радионуклидов в организм человека ингаляционным путем. Фактические измерения дисперсности частиц плутония в легких работников ПО «Маяк» в первые годы его эксплуатации показали, что эти частицы соответствуют по размеру МДФ [28].

Подводя итог, следует подчеркнуть, что дисперсность радиоактивных аэрозолей является важным фактором их миграции от источника образования до человека. Особую значимость на этом пути имеет мелкодисперсная фракция.

Литература

1. Лызлов А.Ф., Мелентьева Р.В., Щербакова Л.М. Применение оптико-радиографического метода для исследования дисперсности промышленных альфа-активных аэрозолей // ВРБ, 2001. № 3, с. 63 - 78.
2. Аладова Е.Е., Хохряков В.Ф., Бондаренко О.А. Исследование физико-химических свойств

- альфа-активных аэрозолей на производстве по получению и переработке плутония // ВРБ, 2002. № 3, с. 20 - 27.
3. Исследование Белоярской АЭС в 1976-1978 гг. / Р.И. Погодин, Л.Г. Диденко, И.Г. Водовозова и др. // Атомная энергия, 1981. Т. 51. № 4, с. 262 - 263.
4. Характеристика газоаэрозольных выбросов Белоярской АЭС им. И.В. Курчатова / И.Г. Водовозова, Л.Г. Диденко, И.И. Колтик и др. // Вопросы защиты и безопасности АЭС, 1984. Вып. 8, с. 188 - 189.
5. *Elder G.H., Casales M., Ettinger H.J.* Plutonium aerosols size characteristics // *Health Physics*. 1974. V. 27. № 1. P. 47 - 53.
6. Трансурановые элементы в окружающей среде / Под ред. У.С. Хенсона. 1985. М.: Энергоиздат. 342 с.
7. *Огородников Б.И., Скитович В.И.* Контроль дисперсности радиоактивных аэрозолей с помощью трехслойных материалов фильтров Петрянова // Актуальные вопросы радиационной гигиены: Тезисы докладов Всесоюзной конференции. Обнинск, 1983, с. 196 - 197.
8. *Hirose K., Aoyama M., Sugimura Y.* Short and long term effects of Chernobyl radioactivity on deposition and air concentration in Japan // *Proc. of an Intern. Symp. On environmental contamination following a major nuclear accident*. V. 1. Vienna, 1990. P. 141 - 149.
9. *Огородников Б.И., Скитович В.И., Будыка А.К.* Дисперсионный состав искусственных и естественных аэрозолей в 30-километровой зоне ЧАЭС в 1986-1996 гг. // *Радиационная биология. Радиоэкология*, 1998. Т. 38. Вып. 6, с. 889 - 892.
10. *Огородников Б.И.* Исследование физико-химических характеристик радиойода при Чернобыльской аварии // *Обзорная информация. Сб. «Проблемы окружающей среды и природных ресурсов»*, 1998. № 4, с. 53 - 117.
11. *Dorrian M.D.* Particle size distributions of radioactive aerosols in the environment // *Radiation protection dosimetry*. 1997. V. 69. № 2. P. 117 - 132.
12. *Райст П.* Введение в теорию. М.: Мир, 1987.
13. *Фетт В.* Атмосферная пыль / Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 336 с.
14. *Юнге С.* Химический состав и радиоактивность атмосферы. М.: Мир, 1965.
15. *Теверовский Е.Н., Дмитриев Е.С.* Перенос аэрозольных частиц турбулентными потоками. М.: Атомэнергоиздат, 1988. 160 с.
16. *Щербакова Л.М., Мелентьева Р.В.* Дисперсность аэрозолей в производственных условиях и окружающей среде // Тезисы VI Международного симпозиума «Урал атомный. Урал промышленный». Екатеринбург, 1992, с. 72 - 73.
17. *Knight A., Creen B., O'Riordan M et al.* An air monitoring programme in the environment of a major nuclear establishment: operation and results // *Proc. 5th Intern. Congr. Jerusalem*. 1980. V. 1. P. 87.
18. *Corey J.C., Pinder J.E. et al.* Stack-released Pu in the terrestrial environment of a chemical separation facility // *Nuclear Safety*. 1982. V. 23. № 3. P. 310 - 319.
19. *Shinn J.H., Homan D.N., Gay D.D.* Plutonium aerosol fluxes and pulmonary exposure rates during resuspension from bare soils near a Chemical Separation facility // *Proc. 4th Int. Conf. on precipitation Scavenging. Dry deposition and resuspension*. Santa Monica. California. 1983.
20. *Jensen L, Regan G., Coranson S. et al.* Ambient monitoring of airborne radioactivity near a former thorium processing plant // *Health Phys*. 1984. V. 46. № 5. P. 1021 - 1035.
21. *Carlton W.H., Murphy C.E., Evans C.E.* Plutonium in the Savannah River Site Environment // *Health Phys*. 1996. V. 71. № 3. P. 290 - 299.
22. Характеристика ингаляционного поступления радионуклидов / В.Т. Хругу, Ю.И. Гаврилин, Ю.О. Константинов и др. // *Материалы конференции «Медицинские аспекты аварии на ЧАЭС»*. Киев: Здоровье, 1988, с. 76 - 87.
23. *Скитович В.И., Будыка А.К., Огородников Б.И.* Результаты двухлетних наблюдений за размерами радиоактивных аэрозольных частиц в 30-км зоне ЧАЭС // *Доклады 1 Всесоюз. Конф. «Радиационные аспекты Чернобыльской аварии»*. СПб., 1993, с. 115 - 121.

24. *Савкин Л.Н.* Особенности радиационной эколого-гигиенической обстановки в 30-километровой зоне ЧАЭС в отдаленные сроки после аварии // *Радиация и риск*, 1993. № 3, с. 94 - 119.
25. Взаимосвязь гранулометрического состава почв юга Белоруссии и распределение в них радионуклидов выброса ЧАЭС / С.Л. Лейнова, Е.М. Данильченко, Е.П. Петряев и др. // *Труды 1 Всесоюзной конференции «Радиационные аспекты Чернобыльской аварии»*. СПб., 1993. Т. 1, с. 242 - 345.
26. *Сельскохозяйственная радиоэкология* / Под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. М.: Экология, 1991.
27. *Чеботина М.Я., Щербакова Л.Н., Пономарева Р.П., Аксенов Г.М.* Прогноз концентраций плутония в воздухе с помощью коэффициента ресуспензии. Сообщение 3 // *Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы II Международной конференции*, Томск, 18-22 октября 2004 г. Томск: Тандэм_Арт, 2004, с. 683 - 685.
28. *Plutonium microdistribution in the lungs of Mayak workers* / F.F. Hahn, S.A. Romanov, R.A. Guilmette et al. // *Radiation research*, 2004. № 161. P. 568 - 581.

ВЛИЯНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

З.Б. Чистова, Ю.Г. Кутинов -

Институт экологических проблем Севера УрО РАН, Архангельск

Любое разрывное нарушение можно представить в виде дизъюнктивной границы (условной плоскости) или геологического тела, объем которого формируется в результате линейной деструкции земной коры. В последнем случае речь идет о зоне динамического влияния разлома (ЗДВР). Под ней понимается область деформирования, связанная с формированием разлома и движениями по нему, в пределах которой горные породы подвержены геологическим, физическим, петрофизическим и структурным преобразованиям [3]. Детальное изучение внутренней организации разрывных нарушений показывает, что вкрест простирания ЗДВР обособлены отдельные дискретные области с разным типом нарушенности земной коры: выделяются осевые полосы максимальной нарушенности, к центральной части которых приурочен магистральный разлом. Осевая полоса ограничена серией сопутствующих разрывов, отделяющих ее от менее интенсивно нарушенных блоков-крыльев разлома. Дискретным строением характеризуются ЗДВР и по простиранию: области, где кора нарушена минимально, чередуются с областями, в которых она нарушена максимально, и это находит свое отражение в геофизических материалах (рис. 1).

Первым соответствуют линейные участки магистрального разлома, практически лишенные сопутствующих разрывов; вторым - деструктивные поля. При картографическом изображении разломных зон обычно выносятся магистральные разломы или их осевые линии, а детали ЗДВР опускаются. В различные эпохи активно проявлялись не все разломы, а часть из них, порой не на всем своем протяжении, а лишь на отрезках, заключенных между разломами других простираний, то есть на своем протяжении разломы при трассировании меняют свои характеристики в геолого-геофизических материалах.

Таким образом, разломы неоднородны как вкрест, так и по простиранию.

На территории севера Восточно-Европейской платформы подавляющее большинство разломов являются нарушениями со смещением слоев в теле фундамента, а в осадочном чехле им обычно соответствуют узкие зоны трещиноватости, флексуобразные перегибы. [1, 2]. Анализ гидрогеологических и гидродинамических особенностей платформенного чехла [4 и др.] позволил сделать вывод о наличии на ряде площадей в зонах разрывных нарушений отчетливых зон пьезоминимумов в осадочном чехле. Эти зоны возникают в результате разгрузки и соответствующего снижения гидростатического давления при наруше-

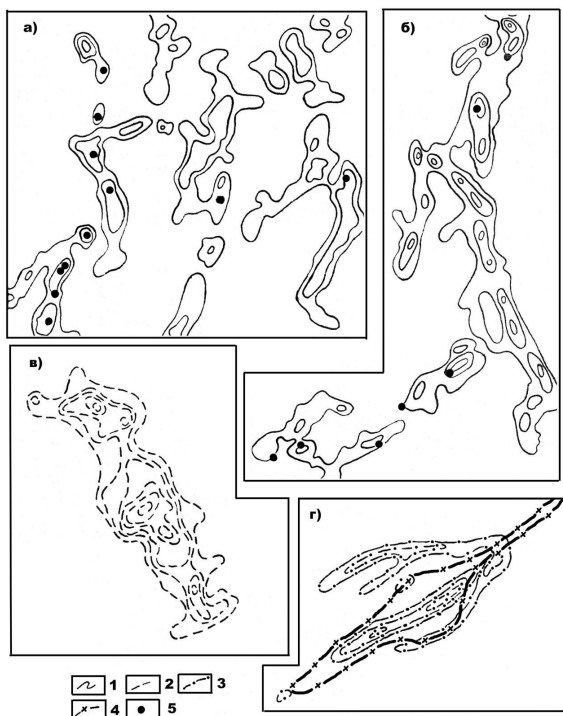


Рис. 1. Внутреннее строение разломов: а) - б) зоны повышенной проводимости по данным аэроэлектроразведочных работ; в) строение разлома; г) результаты атмосферической съемки; 1 – изолинии; 2 – изолинии плотности разрывных нарушений; 3 – изолинии содержания глубинных газов; 4 – контур трубки взрыва; 5 – трубки взрыва

нии разрывами экранирующих свойств покрышек гидрогеологического комплекса.

Наименее изученными являются «энергетические» свойства тектонических нарушений. Индикаторами разломов в геофизических полях являются, как известно, изменения (иногда значительные) электромагнитного поля и поля силы тяжести. Обычно неотектонические подвижки платформенных территорий характеризуются пульсирующим режимом с изменениями направления и амплитуды перемещения, сопровождающимися вариациями электромагнитного поля вдоль дислокации.

Иначе обстоит дело с узлами пересечения тектонических дислокаций, которые представляют собой сложно построенные как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях объемные тела, простирающиеся на значительные глубины (вплоть до поверхности Мохо). С увеличением числа пересекающихся тектонических зон степень раздробленности, проницаемости и глубинность тектонического узла возрастает. Таким образом возникает вертикальная высокопроницаемая область, которая обеспечивает коро-мантийное взаимодействие и постоянный приток флюидов и глубинных газов, т.е. возникает постоянный глубокий стволый канал повышенного тепло-массообмена за счет взаимодействия динамо-пар глубинных дислокаций, который нередко сопровождается повышенной сейсмичностью. При этом узлы пересечения тектонических нарушений, имея сложную структуру поля проводимости, могут являться источниками наведенных вихревых токов, изменяющих общую картину геомагнитного поля (своего рода электрические диполи). Так в результате исследований нами был выявлен факт резкого увеличения амплитудно-частотных характеристик короткопериодических колебаний (КПК) магнитного поля в момент магнитных бурь на площади тектонического узла [6]. Учитывая выявленное увеличение амплитуды КПК магнитного поля в узлах тектонических нарушений [6] и сопоставив это явление с возможностью возникновения наведенных теллурических токов, глубокой дегазации и наличием связи между геомагнитным полем и атмосферным давлением, нами были проведены измерения атмосферного давления над тектоническими узлами, выделенными по авторской методике [1, 2], и установлен факт постоянного «дефицита» атмосферного давления (рис. 2). Эти минимумы получили рабочее название – «статичные».

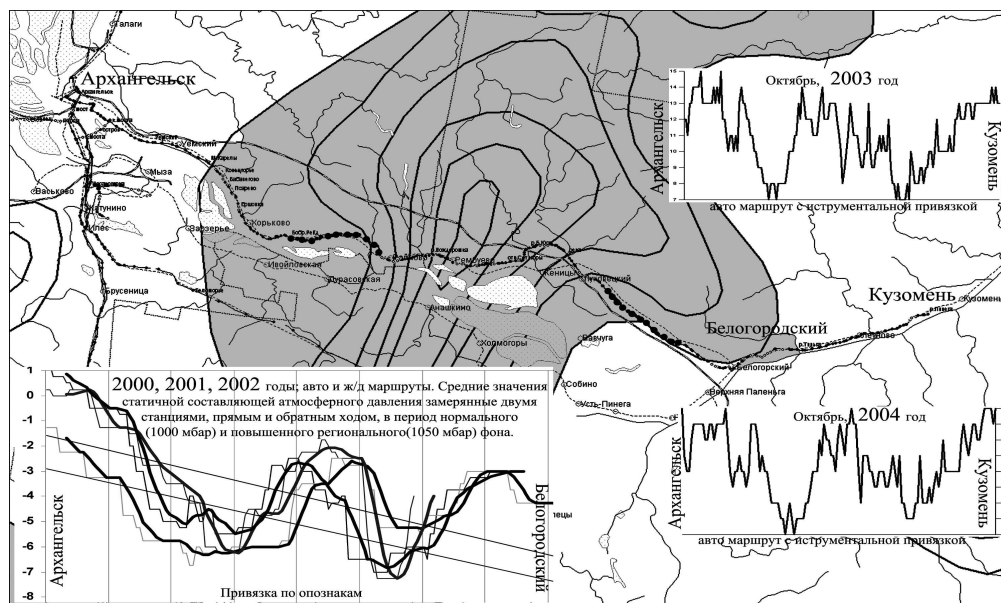


Рис. 2. Строение статичных атмосферных минимумов в тектоническом узле

Предварительное сопоставление данных с магнитным полем региона показало пространственное совпадение минимумов атмосферного давления с границами смены характера магнитного поля, региональными и локальными магнитными аномалиями. Наиболее ярко это проявлено на профиле Архангельск - пос. Светлый, где на границе региональной магнитной аномалии дефицит атмосферного давления достигает 22 mb.

При сопоставлении минимумов атмосферного давления с полем силы тяжести также выделяются участки изменения морфологии поля, выраженные достаточно слабо по сравнению с градиентными зонами северо-западного простирания, картирующими рифейские грабены. Скорее всего, это малоамплитудные глубинные дислокации. Анализ пространственного размещения геохимических аномалий, сопутствующих кимберлитовым полям, показал, что они пространственно совпадают с выделенными атмосферными минимумами.

С тектоническими узлами совпадают места гибели морских звезд и рыб, дихотомии деревьев [1, 2], участки загрязнения почв [5] и участки повышенного содержания тяжелых металлов в коре деревьев. То есть, возможен не только иной механизм выпадения атмосферных осадков за счет перепада давления, но и подток минерализованных вод из глубоких горизонтов земной коры. К тому же, во время магнитных бурь не исключено и изменение ионного состава вод.

Таким образом, полученные данные позволяют говорить о возможном влиянии тектонических узлов и их «энергетических» свойств на экологическое состояние окружающей среды, в том числе и водоемов. При этом вопрос о механизме воздействия на окружающую среду, как самих узлов тектонических нарушений, так и статичных минимумов атмосферного давления нуждается в дальнейшем изучении, так же как и роль каждого из факторов, сопровождающих это природное явление. Это воздействие обусловлено целым набором далеко не равновесных факторов, проявленных с разной интенсивностью в зависимости от конкретных геологических условий и изменяющихся во времени и пространстве. С некоторыми из таких структур связаны геохимические аномалии, например, отрицательно влияющие на дисбаланс в почвах, подземных и грунтовых водах таких элементов как фтор, йод, фосфор, кальций, ртуть, мышьяк, стронций, естественные радионуклиды. Не меньшее влияние на биоту оказывают и газовые составляющие зон региональных разломов, в частности, радон, ртуть, метан, углекислый газ и др.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 05-05-64430 и 05-05-97512.

Литература

1. Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б. Иерархический ряд проявлений щелочно-ультраосновного магматизма Архангельской алмазоносной провинции. Их отражение в геолого-геофизических материалах. Архангельск: ОАО «ИПП «Правда Севера», 2004. 283 с.
2. Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б. Разломно-блоковая тектоника и ее роль в эволюции литосферы // Литосфера и гидросфера Европейского Севера России. Геоэкологические проблемы. Екатеринбург: УрО РАН, 2001, с. 68 - 112.
3. Лобацкая Р.М. О некоторых количественных характеристиках разломов в связи с особенностями их структурной организации // Изв. вузов. Геол. и разведка. 1987. № 10, с. 3 - 12.
4. Любомиров Б. Н. Гидрогеологические условия севера Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции и основные направления дальнейшего изучения // В сб.: Нефтегазоносность северо-востока европейской части СССР и севера Урала. Сыктывкар, 1997, с. 108 - 113.
5. Тарханов С. Н., Прожерина Н. А., Коновалов В. Н. Лесные экосистемы бассейна Северной Двины в условиях атмосферного загрязнения. Диагностика состояния. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 333 с.
6. Чистова З.Б. Выявление геофизических признаков рудного поля, куста и трубки взрыва с целью совершенствования методики поисков коренных источников алмазов на Европейском Севере // В сб.: Геология и полезные ископаемые севера Европейской части СССР. Архангельск, 1991, с. 161 - 171.

ИНТЕГРО - ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ДИФфуЗИОННО-КОНВЕКТИВНОГО УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА РАДОНА В СИЛЬНО НЕОДНОРОДНЫХ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

В.С. Яковлева¹, В.Д. Каратаев¹, П.П. Фирстов² -

¹Томский политехнический университет, Томск

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский

Для моделирования переноса радона широко используются диффузионно-конвективные модели, которые имеют простое аналитическое решение в случае многих ограничений и допущений (когда рассматривается один слой грунта).

Реальная среда является слоистой, поэтому при решении ряда задач необходимо учитывать наличие двух и более эманулирующих слоев грунта с заметно различающимися характеристиками.

При рассмотрении неоднородных сред, особенно, когда коэффициенты уравнения переноса являются функциями, а не постоянными, аналитическое решение невозможно. В данном случае используются численные методы для решения уравнений переноса радона, чему и посвящена данная работа.

В работе была проанализирована пригодность различных численных методов для решения диффузионно-конвективного уравнения переноса радона с разрывными коэффициентами. В случае, когда коэффициенты уравнения на границе двух сред резко изменяются, хорошие результаты дает интегро-интерполяционный метод построения однородных разностных схем (метод баланса). Этот метод учитывает непрерывность потоков и объемной активности радона на границе раздела двух сред.

В данной работе разработан и описан алгоритм решения диффузионно-конвективного уравнения переноса радона с разрывными коэффициентами. Проведены расчеты для многослойных геологических сред с помощью написанной на языке СИ программы «SimRaTran». Результаты расчетов численного моделирования и аналитического решения для 2- х и 3- слойных геологических сред показали хорошее согласие и представлены в настоящей работе.
