

А.В. Кейко

Исследование индустриального метаболизма серы при энергетическом использовании угля

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 29.11.2000 г.

Обсуждена возможность интеграции исследований, проводимых рядом организаций Сибирского отделения РАН в рамках междисциплинарного исследования трансформаций серы при энерготехнологическом использовании угля. Программа исследований построена на использовании концепции индустриального метаболизма и затрагивает широкий круг фундаментальных и прикладных проблем. Выполнение программы обеспечит получение ряда результатов, важных как для совершенствования политики использования топливных ресурсов, так и для расширения научных основ природоохранной деятельности. В частности, окажется возможной оценка природоохранных стратегий путем анализа материальных потоков.

Задачей исследований, программа которых обсуждается в статье, является исчерпывающее выяснение путей движения и механизмов преобразования серы (индустриального метаболизма серы (ИМС)) на всех стадиях промышленного использования ископаемых топлив и в окружающей среде. За последние два десятилетия достигнуты заметные результаты в понимании геофизического цикла серы [1]. Вместе с тем вопросы о величине техногенного вклада в кругооборот серы и о степени антропогенного вмешательства в ее естественный геофизический цикл проработаны еще недостаточно. Это обусловлено отсутствием баланса серы на всех (за редким исключением) стадиях использования серосодержащих материалов. Дефицит сведений о потоках серы в технических системах усугубляется ростом требований к детализации данных о качественном и количественном составе этих потоков. Составление детального баланса требует анализа всех форм присутствия серы в ходе индустриальных процессов, включая утилизацию отходов.

Сера в природе и промышленности

Кругооборот серы

Промышленные процессы с участием серы можно подразделить на две категории. В первой серосодержащие соединения выступают как реагенты и продукты целевых превращений, а во второй они являются сопутствующими примесями в сырье. Наиболее важными целевыми процессами преобразования серы являются получение серной кислоты, цветная металлургия, производство резины, антиоксидантов и удобрений. Наибольшую долю во второй группе составляют энергетические процессы – сжигание и переработка ископаемых топлив. Вклад энергетики в мировой антропогенный оборот серы достигает 80%. Известно, что на долю сжигания угля приходится 67% суммарной мощности антропогенных источников серы, сжигание нефтепродуктов – 12 и выплавку меди – 13%.

Интенсивное промышленное использование серосодержащих веществ достигло уровня, когда масштабы антропогенного оборота серы сопоставимы с ее природными потоками, а удаление серосодержащих отходов угрожает искажением естественного геофизического цикла серы на глобальном уровне. Нарушение природного оборота серы проявляется в повышении кислотности осадков, закислении почв и поверхностных вод суши, что приводит к негативным экономическим последствиям.

Естественный кругооборот серы охватывает все геосферы и происходит при активном участии организмов. Деятельность бактерий денитрификации и сульфобактерий обеспечивает непрерывные превращения серы в почве по общей схеме: $S^{2-} \rightarrow SO_4^{2-} \rightarrow H_2S \rightarrow S^{2-}$. Такие же реакции имеют место в океане. В форме сероводорода H_2S сера поступает в атмосферу. Другим важным природным источником H_2S в атмосфере выступает вулканическая деятельность, сопровождающаяся разложением сульфидов. Среднее время пребывания сероводорода в атмосфере умеренных широт составляет около суток и определяется естественными фотохимическими взаимодействиями, в результате которых сера переходит в форму сульфатов. Все без исключения сульфаты в условиях атмосферы являются конденсированными веществами, многие из которых легко растворимы в воде. Эти свойства обеспечивают сравнительно быстрое выведение сульфатов из атмосферы путем сухого осаждения и вымывания с осадками.

Описание потоков серы

При численном описании глобальных потоков химических элементов в модели, как правило, учитывают следующие резервуары: почвы, подстилающие породы (с различной степенью детализации), поверхностные воды суши, мировой океан (приповерхностный слой иногда представляют отдельным резервуаром), донные осадки, биота, атмосфера. Поскольку обмен веществом между атмосферой и сопредельными

средами происходит лишь в нижнем, пограничном слое, то атмосферу часто описывают как единый резервуар. Для случая серы такое допущение небесспорно, поскольку на высоте 18–20 км существует слой сульфатного аэрозоля (слой Юнге), состоящего на 90% по массе из субмикронных капель серной кислоты с концентрацией около 75%. Механизм образования слоя Юнге еще не достаточно изучен.

Антропогенную составляющую в глобальном балансе серы учитывают, вводя в модель дополнительный резервуар, притоки в который соответствуют добыче ископаемого сырья и топлива, а стоки – выбросам, сбросам и отвалам серосодержащих отходов. Газовые промышленные выбросы выступают крупнейшим источником диоксида серы SO_2 в атмосфере, превышающим в большинстве регионов вклад естественных источников. Эффективность различных стоков SO_2 в атмосфере оценивается следующим образом: сухое осаждение – 45%, жидкофазное окисление – 35%, вымывание с осадками – 11%, газофазное окисление – 9%. Доминирующими формами серы в сбросах являются сульфат-ион и органические соединения серы. При этом значительные количества сульфатов поступают в почву и воду в результате размывания атмосферными осадками золотвалов энергетических и металлургических производств.

О численных показателях массообмена на границе антропогенной подсистемы постоянно ведутся дискуссии. Это связано с объективными трудностями агрегирования неполных и разрозненных инструментальных данных, а также с отсутствием надежных сведений о потоках серосодержащих материалов в пределах антропогенной сферы. В процессах сжигания и переработки топлив баланс серы на уровне установки, как правило, не сходится, соответственно нет достаточных данных для построения баланса на уровне региона. Дефицит информации о качественном и количественном составе потоков серы сказывается наиболее остро при изучении и моделировании трансграничного загрязнения воздуха. В настоящее время разработан ряд региональных моделей рассеивания выбросов, используемых в системах поддержки принятия решений, таких как RAINS и RAINS-ASIA (IIASA, Австрия), EURAD (EURAD Project, Германия), RADM (NCAR, США), STEM-II (университет Айова, США) и других [2]. Опыт применения этих моделей свидетельствует о том, что исходная информация об объемах потребления топлив и выбросах по-прежнему остается самым важным и самым уязвимым звеном в анализе антропогенного воздействия на природу.

Концепция индустриального метаболизма

Ключевые положения

В конце 1980-х гг. ряд ученых независимо выступили с идеями о существенном изменении политики использования природных ресурсов и формировании новой системы контроля их использования. В их

числе были концепция управления притоками (input management) и концепция индустриального метаболизма (industrial metabolism, КИМ). Первая предлагает подбор промышленных ресурсов с целью сокращения производства отходов взамен их утилизации [3]. Вторая представляет системный подход к минимизации образования токсичных веществ, предполагающий анализ всех их источников, путей преобразования и стоков в окружающую среду [4]. При этом анализ источников не ограничивается инвентаризацией промышленных объектов, на которых преобразуется данное вещество, но требует рассмотрения всех стадий жизненного цикла технологий и производственных продуктов.

Очевидно, что указанные концепции взаимно согласуются. В начале 1990-х их называли политикой для экологической устойчивости (policy toward ecological sustainability) [5]. Сейчас многие идеи обоих подходов рассматриваются в рамках промышленной экологии [6], хотя последний термин неоднозначен и представляется неудачным. Фактически исследование индустриального метаболизма является инструментом поддержки принятия решений при управлении любыми ресурсами, включая как сырьевые, так и энергетические и финансовые. Для эффективной реализации КИМ необходимо не только обобщение данных замеров, но и анализ экономических данных о производстве, транспорте и потреблении материалов и энергии.

Тремя основными составляющими КИМ являются следующие [5].

1. Согласование экономических данных о потоках вещества в промышленности и секторе потребления с данными о поступлении загрязнителя в окружающую среду и его накоплении.

2. Совместный анализ сведений о распределении загрязнителя во времени и в пространстве с целью количественной оценки мест поступления загрязнителя и его нагрузки во времени.

3. Оценка изменений в политике использования ресурсов, необходимость которых следует из результатов анализа материальных потоков.

Границы исследуемого региона совпадают, как правило, с границами соответствующего водосборного бассейна. Исследование включает, как правило, следующие стадии.

1. Исчерпывающая инвентаризация организованных источников, включая их расположение, мощности притоков и стоков, удельные характеристики выбросов.

2. Оценка мощности неорганизованных источников исследуемого вещества, таких как свалки, удобряемые сельскохозяйственные земли, системы транспорта и т.п.

3. Моделирование атмосферного транспорта и превращений загрязнителя, включая его газообразные формы и аэрозоль.

4. Построение баланса загрязнителя в гидрографической сети региона, например при помощи гидрологической модели стока.

Применение концепции

В успешно реализованных работах по промышленному метаболизму веществ до сих пор рассматривались нелетучие загрязнители, главным образом соединения переходных металлов. Это объясняется исключительно трудностями описания процессов рассеивания газовых выбросов в атмосфере и не говорит о неприменимости подхода к веществам, образующим летучие формы. Выбор металлов переходного ряда позволил авторам КИМ свести до минимума применение численных моделей рассеивания и в полной мере продемонстрировать возможности подхода, поскольку все наземные потоки соединений металлов поддаются инструментальным измерениям.

Применение КИМ к исследованиям потоков серы имеет ряд особенностей. Наличие у серы летучих форм требует включить в рассмотрение процессы атмосферного транспорта. Кроме того, соединения серы выбрасываются почвой и поступают из-за пределов региона посредством дальнего переноса. Это, безусловно, затрудняет изучение ИМС по сравнению с исследованием переходных элементов. Вместе с тем существуют и особенности, упрощающие задачу.

Так, основными отраслями промышленности, выбрасывающими серосодержащие соединения, являются энергетика и некоторые виды цветной металлургии. При этом содержание серы в углях варьируется от 0,5 до 7%, в природном газе доходит до 35% (Астраханское месторождение), а в рудах может достигать 53%. По причине высоких значений содержание серы в сырье подлежит обязательному учету. Поэтому количество доступных данных о поступлении серы в промышленный оборот заметно превышает объем сведений о переходных металлах. Кроме того, потоки серы в промышленности многократно превосходят по мощности ее потоки в секторе потребления. Поскольку потоки на стадии потребления изделий существенно менее организованы, чем промышленные, и часто представляют трудность для количественного отслеживания, то этот факт может обеспечить заметный выигрыш в точности конечных оценок.

Современные возможности анализа и численных моделей позволяют успешно выполнить программу исследования ИМС. Более того, и КИМ, и сера в качестве объекта исследования представляются весьма удачным выбором для отработки общей методики построения детальной схемы потоков и балансов произвольного загрязнителя.

Программа междисциплинарного исследования

По нашему мнению, исследование ИМС интересно и важно выполнить в Байкальском регионе. Регион относится к особо охраняемым территориям и включен ЮНЕСКО в число участков мирового природного наследия. Естественно, что проведение комплексных экологических исследований наиболее актуально именно здесь. Кроме этого, Байкальский регион обладает рядом преимуществ как территория для применения КИМ к изучению потоков серы. Важная особенность региона – отсутствие видов цветной металлургии, использующих серосодержащее сырье. Как следствие, практически весь объем выбросов серосодержащих соединений приходится на промышленную и коммунальную энергетику, упрощается задача инвентаризации источников выбросов. Другой важной особенностью является наличие единственного речного стока. Гидрохимический анализ в разных точках вдоль р. Ангары позволяет контролировать пути водного транспорта загрязнителей, а также и вклад отдельных промышленных центров. В частности, оценка роли Иркутско-Черемховского промышленного района (ИЧПР) в экосистеме региона имеет важные прикладные выходы. Также немаловажно наличие в Сибирском отделении РАН соответствующих специалистов и техники, что мы покажем ниже.

В соответствии с положениями КИМ нами построена общая схема работ по исследованию ИМС при энергетическом использовании угля (таблица). Схема объединила наиболее крупные разделы работ и не отвергает необходимость выполнения ряда тематически

Междисциплинарное исследование трансформаций серы при энергетическом использовании угля

Раздел работы (стадия использования угля)	Уголь	Горение, газификация	Очистка продуктов	Рассеивание и превращение в атмосфере		Верификация и системные эффекты
				5	6	
1	2	3	4	5	6	7
Объект исследования	Форма присутствия серы в угле	Трансформация серы в процессе горения органического вещества	Формы присутствия серы в отходах энергетических производств	Научные аспекты рассеивания представляют самостоятельный интерес, специфических задач в связи с рассеиванием соединений серы нет	Механизмы химических и фотохимических превращений	Распределение серы между компонентами природной среды
Научная проблема	Функциональный состав серосодержащих фрагментов	Механизмы превращений	Фазовое распределение серы, в т.ч. в составе частиц	Научные аспекты рассеивания представляют самостоятельный интерес, специфических задач в связи с рассеиванием соединений серы нет	1) Образование сульфатов. 2) Аэрозолеобразование, в том числе гомогенная нуклеация	Обобщение и анализ собранной информации

1	2	3	4	5	6	7
Адекватные методы	Инструментальные методы анализа	Численные кинетические и термодинамические модели; аналитические методы	Численные термодинамические модели, аналитические методы	В рамках проекта – инженерная задача, требующая лишь стандартных методов	Численное кинетическое моделирование, экспериментальные исследования	Анализ содержания серы в воздухе и в составе выпадений
Связанные прикладные проблемы	Энерготехнологическое использование углей, в том числе технологии переработки	Построение детального баланса серы, выбор оборудования на долгосрочную перспективу		Управление качеством воздуха	Трансграничное загрязнение воздуха	Рациональное природопользование, экологическая экспертиза
Связанные фундаментальные проблемы	Механизмы формирования рудопроявлений ряда элементов	Прогнозирование развития отдельных энергетических технологий, обоснование соответствующих НИР		Моделирование атмосферной динамики	Климатические эффекты атмосферного цикла серы	Исследования структуры энергетических технологий
Задел *	ИГУ, ИГХ	ИСЭМ, ИХКиГ	ИСЭМ, ИХКиГ	ИСЭМ, ИВМиМГ	ИХКиГ, ИВМиМГ, ИСЭМ	ИСЭМ, ИГХ, ЛИН

* Научные организации СО РАН, имеющие опыт решения указанных или аналогичных задач.

более узких работ, таких как исследование транспорта топлив, динамики речных стоков, перспективных технологий очистки и др. Основные разделы работы имеют следующие условные названия:

1. «Уголь» – исследование качественных и количественных характеристик содержания серы в сырье, включая обзор имеющихся в регионе месторождений и проявлений, а также оценку потерь на стадиях добычи и транспорта;

2. «Горение и газификация» – исследование целевых процессов использования топлива, в том числе химии преобразования соединений серы в установках различных типов и при разных режимах их эксплуатации;

3. «Очистка продуктов» – исследование химии процессов, протекающих на стадии утилизации энергетических выбросов;

4. «Рассеивание и превращения в атмосфере» – фактически два тесно связанных, но самостоятельных раздела, рассматривающих соответственно физику и химию поведения серосодержащих загрязнителей, включая газообразные и взвешенные;

5. «Системные эффекты» – исследование стоков серы в окружающую среду, необходимое для замыкания баланса серы, построенного по результатам предыдущих разделов.

Выполнение работ по каждому из перечисленных разделов связано как с решением конкретных прикладных проблем, так и с развитием определенных направлений фундаментальных исследований. Чтобы осветить круг связанных проблем, а также содержание и адекватные методы соответствующих исследований, обсудим их кратко по разделам.

Добыча и транспорт

Данный раздел включает две составляющие:

1) исследование месторождений и проявлений угля в

регионе и 2) анализ информации о добыче угля и транспортировке его к местам потребления.

Исследование мест залегания угля предполагает качественный и количественный анализ состава серосодержащих компонентов и фрагментов в составе угля, а также получение усредненных характеристик для действующих и перспективных разрезов. Функциональный состав ряда углей Восточной Сибири определен в Иркутском государственном университете (ИГУ) [7]. Показано, что на долю органической массы угля приходится 0,5–1,0% серы, остальное содержится в минеральной части. При этом основная масса органической серы содержится в гетероциклах, а в молодых углях – на поверхности в форме тиоловых групп (–SH). К сожалению, коллектив, выполнивший эти исследования, в настоящее время распался.

Важной характеристикой является доля серы, которая может при сжигании переходить в газовую фазу. Результаты исследования, выполненного в ИСЭМ, показали, что эта величина составляет около 50%. Получение данных о составе серосодержащих компонентов угля является задачей инструментальных исследований. Так, долю горючей серы можно определить сочетанием различных методов элементного анализа, например, метода сжигания с рентгенофлуоресцентным методом.

Содержание серы в угле определяет возможность его энерготехнологического использования. В углях, сжигаемых в Иркутской области и Бурятии, оно составляет от 0,3 до 3,5%. При этом есть разведанные месторождения углей, высокое содержание серы в которых не позволяет использовать их для целей энергетики без предварительного дорогостоящего обессеривания. Промышленных технологий обессеривания в Байкальском регионе пока нет. По мере сокращения запасов малосернистых углей и увеличения общих объемов потребления угля освоение ресурсов высокосернистых углей будет все более актуально.

Поэтому в данном разделе исследований ИМС одной из связанных прикладных проблем является выбор технологий переработки углей. Опыт таких исследований имеется в ИСЭМ.

В части инвентаризации мест залегания угля – от действующих и разведанных промышленных месторождений до маломощных проявлений – значительный опыт накоплен в ИГХ СО РАН. Так, коллективом под руководством Ю.П. Трошина выполнены обширные полевые исследования в ИЧПР, касающиеся серосодержания как сортовых, так и низкосортных углей и горючих сланцев.

Вторая задача данного раздела исследований – анализ статистических данных об объемах добычи и транспортных потоках угля в Байкальском регионе. Сбор и обобщение таких данных проводятся в ИСЭМ. Имеется информация о структуре потребления топлив в Иркутской области, известны тепловые и электрические нагрузки многих потребителей топлива.

Сжигание и переработка

Объектом исследования в рамках этого раздела являются трансформации соединений серы в процессе горения ископаемых топлив, а именно компонентный состав и механизмы химических превращений серосодержащих веществ в широком диапазоне условий горения. Важно найти показатели распределения серы между продуктами сгорания, включая различные фракции твердых частиц в уносе, и добиться выполнения балансов серы для отдельных энергетических технологий. В числе технологий необходимо рассмотреть факельное сжигание, непрерывное и периодическое слоевое сжигание, сжигание в кипящем слое, газификацию и некоторые другие.

Помимо инструментальных методов, в программе раздела планируется использовать численные модели химической термодинамики и химической кинетики. Задел в этой области имеется в ИСЭМ. Построены модели экстремальных промежуточных состояний, позволяющие исследовать химические процессы вдали от их равновесного состояния [8]. Имеется существенный задел в развитии вычислительных инструментов для термодинамического и кинетического моделирования процессов горения и переработки топлив [9, 10], выполнены модельные исследования ряда таких процессов. Совместно с НИИ биологии при ИГУ и Лимнологическим институтом СО РАН (ЛИН) проведены обширные натурные исследования процессов образования и трансформации вредных веществ на действующих энергетических установках [11, 12].

Опыт в построении и исследовании моделей химической кинетики для процессов горения имеется в Институте химической кинетики и горения СО РАН (ИХКиГ). Здесь выполнялись работы в том числе по численному моделированию кинетики превращений серы при горении углеводородных топлив.

Построение детального баланса серы для различных типов топочных устройств само по себе явля-

ется решением важной прикладной задачи. Кроме того, результаты, полученные в рамках данного раздела работ, могут быть использованы при оптимизации режимов работы энергетического оборудования и выборе оборудования на долгосрочную перспективу.

Другая важная составляющая этого раздела – исчерпывающая инвентаризация энергетических источников на рассматриваемой территории. Это весьма трудоемкая часть исследования, требующая сотрудничества с рядом неакадемических организаций, в том числе с территориальными администрациями, органами Госкомэкологии и Госэнергонадзора. Задел в части инвентаризации энергоисточников Иркутской области имеется в ИСЭМ.

Утилизация отходов

Исследование форм присутствия серы в отходах энергетических производств предполагает изучение фазового распределения серы, в том числе в составе частиц с учетом реального распределения частиц по размерам. Как и в предыдущем разделе, можно очертить круг технологий очистки, которые необходимо рассмотреть. В их числе – скрубберы, эмульгаторы и электрофилтры. Важно исследовать эффективность улавливания не только газообразных соединений серы, но и частиц, поскольку содержание серы в их составе часто велико.

Наиболее эффективными методами решения этой задачи являются инструментальные исследования уходящих газов, летучих частиц и шлака. Опыт таких исследований имеется в ИСЭМ и в ИХКиГ. Наряду с инструментальными исследованиями могут оказаться эффективными и численные модели гетерофазных систем, в частности термодинамические модели растворов, разработанные в ИСЭМ [8, 10].

Как и при исследовании горения топлив, связанными прикладными и фундаментальными проблемами в этом разделе являются прогнозирование развития энергетических технологий и оптимизация режимов эксплуатации оборудования.

Рассеивание и превращения выбросов в атмосфере

При изучении путей поступления техногенной серы в окружающую среду исследования физики и химии поведения серосодержащих загрязнителей в атмосфере необходимы для замыкания экоиндустриального баланса серы в регионе. В настоящее время наиболее эффективным подходом в этой области является численное моделирование.

Научные аспекты построения моделей рассеивания представляют самостоятельный интерес и находятся за рамками исследований ИМС. Соединения серы не имеют каких-либо специфических особенностей, которые могли бы потребовать модернизации существующих моделей рассеивания. Поэтому в рамках обсуждаемых работ представляется целесообразным использовать апробированные модели, используемые

в настоящее время для решения аналогичных прикладных задач [2, 13].

Учет химических и фотохимических трансформаций, важных для атмосферной химии соединений серы, требует привлечения численных моделей химической кинетики. Необходимость рассмотрения газофазных трансформаций при исследовании индустриального метаболизма составляет предмет новизны и требует выработки новых способов агрегирования отдельных показателей. Двумя важнейшими задачами при моделировании трансформаций серосодержащих соединений являются количественная оценка образования сульфатов в атмосфере и выявление роли гетерогенных процессов, включая гомогенную нуклеацию (образование аэрозоля из газообразных веществ). Работы по созданию и исследованию фотохимических моделей атмосферы проводились в ИСЭМ и ИХКиГ. При этом только в коллективе под руководством Г.И. Скубневской (ИХКиГ) имеется опыт исследования гомогенной нуклеации SO_2 .

Участие серы в химии атмосферных аэрозолей включает целый ряд аспектов, имеющих самостоятельное прикладное значение. Так, совместный транспорт газообразных соединений серы с пылью сказывается на путях и скорости выведения обоих загрязнителей [14]. Отсутствие на территории Сибири кислотных дождей с $pH < 4$ не согласуется с высокими объемами выбросов серосодержащих загрязнителей. Для объяснения этого феномена в ИХКиГ выдвинута гипотеза о существовании в атмосфере Сибири дополнительного гетерогенного стока этих веществ. Модельные расчеты, выполненные в ИСЭМ, свидетельствуют о большей повторяемости туманов и осадков в атмосфере, загрязненной оксидами серы [15], что подтверждается натурными наблюдениями. Подходы к оценке масштабов вторичного загрязнения разрабатывались в ИСЭМ [16]. В рамках проекта по интеграционному гранту СО РАН налажено сотрудничество между ИСЭМ, ИХКиГ и ИВМиМГ (Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН) [17]. В ИВМиМГ имеется богатейший опыт построения региональных моделей рассеивания, совместно описывающих транспорт и трансформации загрязнителей.

Системные эффекты

Стадия верификации результатов и анализа системных эффектов позволяет проверить сходимость экоиндустриального баланса серы, построенного на предыдущих этапах, и предполагает исследование распределения серы между компонентами природной среды. Основными задачами являются 1) обобщение количественных сведений о поступлении техногенной серы в окружающую среду и 2) построение и анализ искомой схемы ИМС.

Первая из указанных задач предполагает сбор и анализ данных о формах и содержании серы в атмосферных осадках и речной сети региона. При исследовании естественных сред возможности четкого отне-

сения некоторой части серосодержащих веществ к категории «техногенной» или «естественной» серы ограничены. Для подобного разнесения по категориям обычно требуются нерутинные методы, например изотопный анализ или трассерные исследования. Автор не располагает информацией о технической возможности проведения таких работ в Сибири. В то же время некоторый положительный опыт в этой области имеется в ИГХ. Кроме того, в ИГХ на протяжении десяти лет выполнялся мониторинг общего содержания серы в различных компонентах естественных экосистем Иркутской области – почве, воде, отдельных частях растений, листе разных ярусов. ИГХ и ЛИН имеют опыт в снегосъемке, обширные гидрохимические исследования проводятся в ИГУ. Исследование водных путей миграции серы может быть основано на данных мониторинга органами Госкомэкологии качества воды в крупнейших реках Байкальского региона.

Для получения искомой схемы антропогенных потоков серы требуется решить задачу корректного агрегирования показателей. Эта задача является методической и не требует выполнения экспериментальных работ. Вместе с тем, чтобы исследование в целом приобрело завершенный характер, необходимо оценить вклад в антропогенный оборот серы в регионе серосодержащих нефтепродуктов, в частности мазута. Лучший учет этих материалов и меньшие объемы их потребления (по сравнению с углем), а также большая степень организации мазутных энергоисточников делают эту задачу выполнимой.

Важнейшим результатом этого раздела является идентификация источников выбросов, позволяющая выявить неучтенные источники и уточнить характеристики известных. Результатом анализа полной схемы индустриального метаболизма должны стать выводы относительно эффективности современной практики использования серосодержащих сырьевых ресурсов.

Заключение

Выполнение программы исследований обеспечит получение ряда результатов, касающихся как совершенствования политики использования топливных ресурсов Байкальского региона, так и расширения научных основ природоохранной деятельности. В частности, окажется возможной оценка природоохранных стратегий путем анализа материальных потоков. В целом программа исследования технически реализуема и отвечает положениям Концепции экологической политики России до 2010 г. [18], разрабатываемой в настоящее время.

1. *Иванов В.В.* Экологическая геохимия элементов: Справочник. Кн. 2 (Экогеохимия главных р-элементов) / Под ред. Э.К. Буренкова. М.: Экология, 1994. С. 236–263.
2. *Кейко А.В., Куменко Е.В., Филитов С.П., Павлов П.П.* Моделирование воздействия энергетики на качество воздуха. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 1999. 44 с.
3. *Odum E.P.* Input management of production systems // Science. 1989. V. 243. P. 177–182.

4. *Ayres R.U., Norberg-Bohm V., Prince J., Stigliani W.M., Janowitz Y.* Industrial metabolism, the environment, and application of material balance principles for selected chemicals. IASA. Laxenburg, 1989. RR-89-11.
5. *Stigliani W.M., Jaffe P.R.* Industrial metabolism and river basin studies: a new approach for the analysis of chemical pollution. IASA. Laxenburg, Austria, 1993. RR-93-6.
6. *Industrial Ecology and Global Change.* Cambridge University Press, 1994. 500 p.
7. *Химия и переработка угля* / В.Г. Липович, Г.А. Калабин, И.В. Калечиц и др. М.: Химия, 1988. 336 с.
8. *Каганович Б.М., Филиппов С.П.* Равновесная термодинамика и математическое программирование. Новосибирск: Наука, 1995. 256 с.
9. *Кейко А.В.* Пакет программ для кинетического анализа термодинамических процессов. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 1996. 45 с.
10. *Кейко А.В., Ширкалин И.А., Филиппов С.П.* Вычислительные инструменты для термодинамического анализа. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 1999. 47 с.
11. *Филиппов С.П., Кейко А.В., Павлов П.П.* Экспериментальное определение выбросов сажи и ПАУ котельными и домовыми печами // Изв. РАН. Энергетика. 2000. № 3. С. 108–118.
12. *Филиппов С.П., Павлов П.П., Кейко А.В., Горшков А.Г., Белых Л.И.* Экологические характеристики теплоисточников малой мощности. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 1999. 48 с.
13. *Кейко А.В., Филиппов С.П., Павлов П.П.* О методах оценки влияния энергетики на качество воздуха // Геогр. и природ. ресурсы. 2000. № 1. С.127–132.
14. *Xiao H., Carmichael G.R., Durchenwald J.* The transport of dust and SO_x in East Asia during the PEM-B experiment // Air pollution modelling and its application. XII. Plenum Press, 1998. P. 217–224.
15. *Кучменко Е.В., Моложникова Е.В., Кейко А.В.* Влияние метеорологических условий на вторичное загрязнение атмосферы // Тез. докл. Третьей Верещагинск. Байкальск. конф. Иркутск, 22–27 августа 2000. Иркутск: ЛИИ СО РАН, 2000. С. 123–124.
16. *Keiko A.V.* Secondary pollutants formation: variation of exposure due to quantitative change in energy emissions // Air Pollution Modelling and Its Application / Ed. by S.-E. Gryning. Kluwer Press, 2000. P. 367–372.
17. *Penenko V.V., Skubnevskaya G.I., Keiko A.V., Dulzeva G.G.* Numerical modeling of chemical kinetics and transport of pollutants in the atmosphere of industrial regions // Proc. of the 4th Int. Conf. Chem. Kinet. Gaithersburg, USA, July 14–18, 1997. Rep. L15.
18. *Концепция экологической политики России* // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. Обзорная информация. 2000. № 7. С. 63–76.

A.V. Keiko. Studies of sulphur industrial metabolism in the coal-based energy production.

The discussion is given to the possible integration of research conducted by institutes of Siberian Branch of RAS on the program of interdisciplinary study of sulphur transformations in the industrial use of coal. The program is based on the concept of industrial metabolism and is connected with a wide range of fundamental and applied problems. Implementation of the program provides a number of improvements both in the policy of fuel resources use and in the environmental protection activity. In particular, it would enable the evaluation of environmental protection strategies through the analysis of material flows.