

Аргучинцева А.В., д-р  
техн. наук, проф., декан,  
зав. кафедрой

Аргучинцев В.К., д-р  
техн. наук, проф., зав.  
кафедрой

Иркутский  
государственный  
университет, Россия

Участники конференции,  
Национального первенства  
по научной аналитике

## МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОХРАНЫ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

*В статье предлагаются авторские модели для описания процессов и распространения антропогенных примесей в различных средах (в атмосфере, гидросфере и на подстилающей поверхности). Все модели прошли апробацию на реальных объектах.*

**Ключевые слова:** модель, атмосфера, гидросфера, подстилающая поверхность, перенос, турбулентная диффузия, примесь.

*In article author's models for the description of processes and distribution of anthropogenous impurity to various environments (in atmosphere, hydrosphere and on a layer surface) are offered. All models have passed approbation on real objects.*

**Keywords:** model, atmosphere, hydrosphere, layer surface, transference, turbulent diffusion, impurity.

Рациональное природопользование связано со стратегией выживания человечества и созданием научных основ регулирования качества окружающей среды с целью обеспечения экологической безопасности. В рамках указанной проблемы актуальной задачей является построение региональных моделей для описания закономерностей возникновения и развития опасных природных и техноприродных процессов в атмосфере, гидросфере и почве с целью принятия предупредительных мер по снижению влияния катастрофических последствий.

Необходимо отметить, что вид хозяйственной деятельности и ее рентабельность существенно зависят от регионального климата. При этом важно знать не только длинноволновые климатические характеристики, но и краткосрочные климатические экстремумы. Существующая сеть наблюдений для экспериментального изучения распределения примесей слишком редка или вообще отсутствует, особенно в условиях сильно пересеченной местности, например, над горными районами и крупными водоемами. Одним из перспективных методов исследования является математическое моделирование для экспериментирования, проверки гипотез и прогноза.

При моделировании переноса загрязняющих веществ в настоящее время используются различные методы: эмпирико-статистический подход; стандартные (го-стированные) методики; гауссовская модель факела; модели, основанные на аналитических и численных решениях уравнений переноса и турбулентной диффузии примесей. Эмпирико-статистические методы дают лишь диагностику для района отбора проб на данный отрезок времени. Существенным недостатком аналитических методов является то, что они применимы только для орографически и термически однородной местности. Возникают

проблемы из-за незамкнутости полуэмпирических уравнений, описывающих перенос и турбулентную диффузию примесей. Основной трудностью при моделировании является необходимость совместного решения уравнений гидротермодинамики и уравнений переноса и трансформации примесей в атмосфере. Отметим также, что расчеты, проводимые по имеющимся в настоящее время моделям, дают, как правило, лишь абсолютные концентрации загрязняющих ингредиентов для выбранных по каким-то соображениям метеорологических условий. Однако во многих задачах практики интерес представляют зоны опасных концентраций ингредиентов с точки зрения не только превышения установленных для них норм (например, предельно допустимых концентраций), но и долговременности воздействия на среду. Именно продолжительность воздействия загрязняющих ингредиентов создает реальную угрозу наиболее уязвимым объектам, способствует возникновению кумулятивного эффекта, который может привести к отсроченным негативным последствиям и необратимым отклонениям от природного равновесия. Поэтому представляют определенный интерес математические модели, способные выявить зоны рискованных воздействий на природную среду с учетом всех климатических особенностей изучаемого региона.

В данной работе авторы предлагают ряд разработанных ими диагностических и прогностических методов и моделей для описания пространственно-временных распределений естественных и антропогенных примесей с учетом вероятностной структуры мезо- и микроклиматических условий, определяемых состоянием системы атмосфера – гидросфера – деятельный слой суши [1]. Дадим их краткую характеристику.

### 1) Прогностическая модель пере-

**носа и трансформации газовых и аэрозольных примесей с учетом химических реакций в атмосфере.** Особенностью изучаемых процессов являются большие различия в характерных временах фотохимических реакций, процессов переноса химических веществ и в изменчивости метеорологических полей, что предъявляет высокие требования к устойчивости, точности и экономичности используемых численных методов решения системы уравнений. Для определения скоростей движения примесей и коэффициентов турбулентной диффузии в условиях термически и орографически неоднородной местности решаются совместно уравнения гидротермодинамики и переноса примесей. В качестве гидродинамической основы используется негидростатическая модель мезомасштабного пограничного слоя сжимаемой атмосферы. В систему дифференциальных уравнений нестационарной трехмерной нелинейной модели включаются: уравнения движения, уравнение притока тепла, уравнение неразрывности, уравнение состояния воздуха. Краевые условия на границах задаются в виде потоков количества движения (импульса), тепла и массы. На границе раздела атмосфера-суша используется условие баланса тепла. Для описания распространения тепла в почве используется уравнение теплопроводности. Такая модель позволяет описать широкий класс мезомасштабных явлений: горно-долинные циркуляции с внешним ветром; кататические ветры; орографические волны; мезомасштабную структуру метеорологических фронтов; конвекцию, возникающую за счет антропогенных факторов, и т.д.

2) **Прогностическая модель переноса и трансформации антропогенных примесей в водоемах.** В качестве гидродинамической основы используется негидростатическая нестационарная трех-

мерная нелинейная модель гидротермодинамических процессов стратифицированных водоемов. Модель предназначена для описания полей скоростей течений, температуры и плотности воды в озерах, водохранилищах естественного и искусственного происхождения. Дифференциальные уравнения нестационарной трехмерной нелинейной модели включают уравнения движения; уравнение энергии; уравнение неразрывности; нелинейное уравнение состояния воды, связывающее давление, температуру, плотность и соленость. Краевые условия на границах задаются в виде потоков количества движения (импульса), массы и тепла. На твердых границах для скорости движения задано условие «прилипания». При решении нестационарных задач из-за отсутствия необходимой информации о гидрологических полях начальные условия заменяются информацией о фоновых величинах или из решения соответствующих стационарных задач. Предлагается негидростатическая модель с учетом сжимаемости воды и всех составляющих силы Кориолиса. Такая модель, с одной стороны, позволяет описывать крупномасштабные процессы (например, действие силы Кориолиса) в озерах, имеющих большие размеры, а с другой, – мезомасштабные явления, например, такие как термический бар, формирующий вертикальную циркуляцию весной и осенью вследствие различной стратификации воды прибрежных и центральных частей водоема. Использование полного уравнения состояния с учетом солености позволяет моделировать плотностные течения в окрестности геотермальных источников, обнаруженных у дна некоторых водоемов. Граничные условия задаются так, чтобы обеспечить выполнение законов сохранения импульса, тепла и массы в водоеме.

Для рек гидрологические характеристики находятся на основе решения уравнений теории мелкой воды с параметризацией влияния силы трения о дно и учетом турбулентного обмена по горизонтали:

Решение уравнений предложенных моделей (пункты 1 и 2) осуществляется конечно-разностными методами расщепления по физическим процессам и геометрическим переменным [2]. Аппроксимация по времени строится на основе двуциклического полного расщепления со схемой Кранка-Николсона на каждом дробном шаге. Построена полуявная конечно-разностная схема покомпонентного расщепления. Заметим, что, несмотря на

использование более полного уравнения неразрывности для сжимаемых сред, метод решения задач экономичнее, так как все дифференциальные уравнения являются эволюционными. Отметим также, что предлагаемый численный метод пригоден для решения жестких систем дифференциальных уравнений при интегрировании уравнений химической кинетики на отдельном шаге по времени.

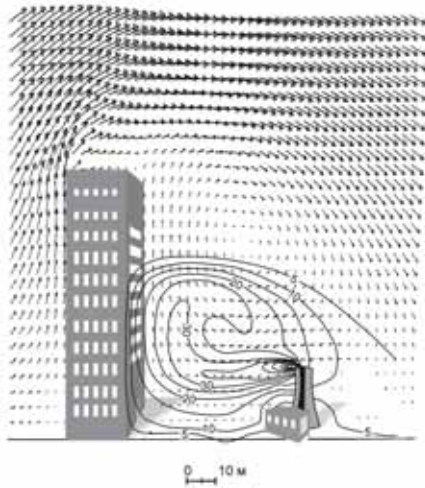
**3) Климатическая модель расчета характеристик загрязнения на основе использования аналитических решений.** Все реальные геосистемы находятся под воздействием внешней среды, состояние которой может меняться случайным образом. Это приводит к тому, что ряд параметров, обуславливающих это состояние, имеет случайные составляющие. Поэтому необходимо большое внимание уделять разработке стохастических моделей, которые, кроме общепринятых мгновенных и осредненных характеристик, дают вероятностную оценку наступления интересующего события. На основе известных аналитических решений, полученных для дифференциальных уравнений, описывающих перенос и турбулентную диффузию примесей, разработаны конструктивные методы и модели, позволяющие оценивать частоту превышения допустимых норм загрязнения и накопление частиц на подстилающей поверхности за интересующий интервал времени. Несмотря на то, что все аналитические решения получены при некоторых обоснованных упрощениях реальных физических процессов, их возможности в предлагаемых вероятностных моделях значительно расширяются благодаря замыканию их на климатические функции плотности вероятности, построенные для многолетних рядов метеорологических наблюдений.

**4) Климатические модели на основе использования второго уравнения Колмогорова (уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова).** Предложен новый более общий подход к построению комплекса математических моделей для оценки распределения антропогенных примесей, попадающих в окружающую среду путем выбросов промышленных предприятий через трубы, вентиляционные решетки, золоотвалы и пр. Все модели учитывают случайность поведения среды, в которой распространяется примесь, посредством введения функции плотности переходных вероятностей состояний этой среды. В основу описания

случайного процесса берется второе, или прямое, уравнение Колмогорова (Фоккера-Планка-Колмогорова), связывающее скорость изменения плотности вероятности распределения субстанций с расширением ее потока, при условии, что начальные условия, накладываемые на плотность вероятности, удовлетворяют условиям неотрицательности и согласующейся нормировки. Уравнение Колмогорова записывается в фазовой координате, в качестве которой выступает концентрация примеси. Для отыскания входящих в него коэффициентов проводится последовательное замыкание уравнения Колмогорова с использованием уравнения переноса консервативной примеси, обладающей собственной гравитационной скоростью в анизотропной среде. В результате этой операции для одного из коэффициентов уравнения Колмогорова выводится дифференциальное уравнение, которое описывает изменение средних концентраций ингредиентов в анизотропной среде с учетом флуктуаций параметров среды, в которой распространяется примесь, и нестационарности работы источников. Вследствие этого новое выведенное уравнение представляет самостоятельный интерес для практических целей. Непрерывное многообразие возможных состояний аппроксимируется на основе многолетних климатических рядов наблюдений на стационарных метеорологических станциях и постах. Трудности, связанные с неэргодичностью природных явлений, преодолеваются путем усреднения не по времени, а по реализациям. Полученные замкнутые уравнения (уравнение Колмогорова и уравнение для одного из его коэффициентов) с записанными для них соответствующими начальными и граничными условиями решаются численно в декартовой прямоугольной системе координат с применением метода фиктивных областей. Для дискретизации по времени используется схема Кранка-Николсона и двуциклический метод многокомпонентного расщепления [2].

При построении климатических моделей использовалась идея связи стохастического и динамического описаний физических процессов с учетом вероятностной структуры полной группы гидрометеорологических характеристик конкретных регионов (с произвольными функциями плотности вероятности).

Предложенные модели предназна-



**Рис.1. Структура воздушного потока и его влияние на распространение примеси.**

чаются для решения различных теоретических и практических задач охраны природной среды: исследования гидротермодинамических процессов и распространения антропогенных примесей, изучения и прогноза мезо- и микроклиматических условий при наличии антропогенных факторов, выяснения влияния структуры воздушного потока на закономерности загрязнения в районах городской застройки, проектирования зданий и систем обеспечения микроклимата, определения эффективности мероприятий по совершенствованию технологии и системы очистки выбросов действующих и проектируемых предприятий, их оптимального размещения и регулирования суточного и сезонного режимов работы.

Учет климатических особенностей изучаемых регионов через функцию плотности переходных вероятностей состояний среды позволяет: а) оценить вероятности возникновения опасных концентраций; б) оконтурить области повышенной антропогенной нагрузки; в) рассчитать потоки взвешенных частиц на подстилающую поверхность; г) установить продолжительность пребывания живых организмов в опасных зонах; 5) найти средние концентрации ингредиентов с учетом флуктуаций как метеорологических параметров, так и интенсивности загрязняющих источников за рассматриваемый отрезок времени.

Расчеты по перечисленным моделям, картирование местностей по опасности загрязнения демонстрируются многочисленными примерами для различных

регионов России и зарубежных стран. Реальные результаты помогли решить ряд насущных проблем, например, таких как выявление виновников аварийных ситуаций; перепрофилирование предприятий; выбор очистных сооружений, вариантов размещения вновь строящихся объектов, конфигурации пылящих пляжей отвалов и золоотвалов.

В качестве примера приведем результаты моделирования влияния структуры воздушного потока на распространение загрязнения в районе городской застройки (рис.). Расчеты проводились при следующих значениях параметров: шаги по вертикали и горизонтали 2 м, шаг по времени выбирался с учетом выполнения критерия Куранта для наибольшей скорости невозмущенного потока 10 м/с. Изолинии концентрации примеси приведены в процентах по отношению к наибольшей концентрации в точке выброса над невысоким зданием. Если источник расположен

в зоне разряжения, то примесь попадает в подветренную область за высоким зданием и распространяется в направлении, противоположном невозмущенному потоку. Уменьшение концентрации примеси возможно лишь при существенном увеличении высоты трубы, что практически неосуществимо.

Все модели прошли апробацию на реальных объектах России (Хабаровск, Чита, Улан-Удэ, Гусиноозерск, Иркутск, Ангарск, Омск и др.), Монголии, Китая.

### Литература:

1. Аргучинцева А.В. Моделирование и управление процессами регионального развития / А.В.Аргучинцева, В.К.Аргучинцев, В.А.Батулин и др. М.: Наука, Физматлит, 2001. – 432 с.
2. Марчук Г.И. Приоритеты глобальной экологии / Г.И.Марчук, К.Я. Кондратьев. – М.: Наука, 1992. – 263 с.

