**Лаборатория математического моделирования**

**гидротермодинамических процессов в природной среде**

Зав. лабораторией д.ф.-м.н. Пененко В. В.

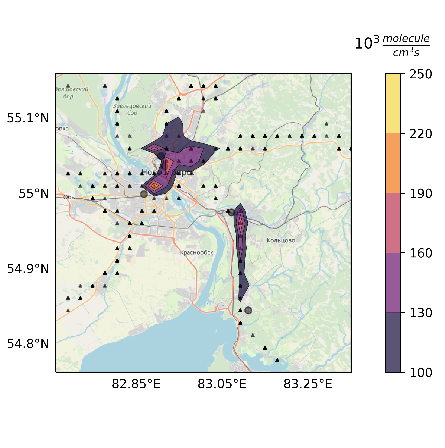
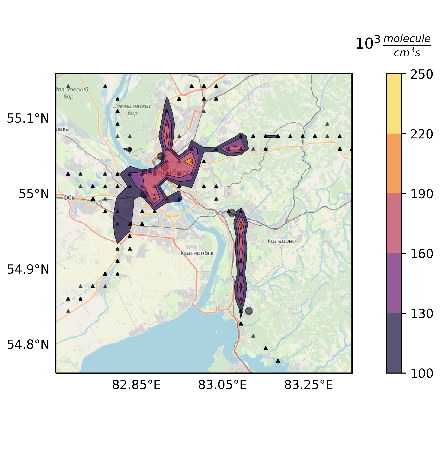
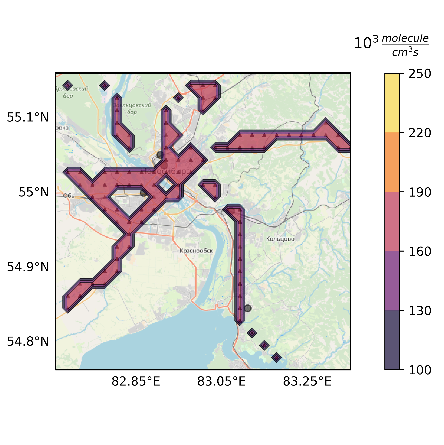
**Важнейшие достижения**

**Важнейший результат в 2019 году**

**Новый алгоритм решения обратной задачи идентификации источников на основе операторов чувствительности целевых функционалов по данным измерений типа изображений**

Д.ф.-м.н. Пененко В.В., к.ф.-м.н., Пененко А.В.

Для нестационарных моделей переноса и трансформации примесей в атмосфере (моделей адвекции-диффузии-реакции) различной пространственной размерности разработан алгоритм идентификации источников на основе операторов чувствительности целевых функционалов по данным измерений типа изображений (т.е. временных рядов значений функции состояния модели в заданных точках области, высотных профилей и изображений функции состояния в определённые моменты времени). Операторы чувствительности строятся на основе ансамблей решений сопряжённых задач, соответствующих заданному набору целевых функционалов от функций состояния модели [1-3]. Благодаря ансамблевому характеру алгоритма, он естественно отображается на параллельные вычислительные архитектуры. На рис. 1 представлен результат работы алгоритма по восстановлению функции источников загрязнений по данным мониторинга [1]. Алгоритм применим и в других областях приложений, в частности, к задачам идентификации источников для моделей биологии развития по данным микроскопии [2].



(a) (b) (c)

Рис.1 Сценарный расчет, на примере г. Новосибирска, по идентификации стационарных источников  (a) по временным рядам концентрации  на 5 постах мониторинга; проекция точного решения на дополнение ядру оператора чувствительности (оценка «видимого» источника) (b); и результат решения задачи идентификации источников (с).

**Результаты опубликованы в работах**

1. Penenko, V. V.; Penenko, A. V.; Tsvetova, E. A., Gochakov A.V. Methods for studying the sensitivity of air quality models and inverse problems of geophysical hydrothermodynamics // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2019, V. 60, P.: 392-399, doi: 10.1134/S0021894419020202
2. Penenko, A.; Zubairova, U.; Mukatova, Z. & Nikolaev, S. Numerical algorithm for morphogen synthesis region identification with indirect image-type measurement data // Journal of Bioinformatics and Computational Biology, World Scientific Pub Co Pte Lt, 2019, V. 17, 1940002, doi: 10.1142/s021972001940002x
3. Penenko, A. A Newton-Kantorovich method in inverse source problems for production-destruction models with time series-type measurement data // Numerical Analysis and Applications, Pleiades Publishing Ltd, 2019 , V. 12 , P. 51-69, doi: 10.1134/S1995423919010051

**Отчет по этапам работ, завершенным в 2019 г.**

**в соответствии с планом НИР института**

**Проект НИР I.3.1.2** "Исследование процессов в атмосфере, гидросфере и окружающей среде методами математического моделирования".

Номер государственной регистрации НИР 01201370227.

Руководители: д.ф.-м.н. Пененко В. В., д.ф.-м.н. Платов Г. А.

**Раздел 1** "Развитие моделей и методов для оценок экологической перспективы".

Руководитель – д.ф.-м.н. Пененко В. В.

Достигнутые в 2019 году результаты:

1. Разработаны новые версии моделей, входящих в комплекс моделей гидротермодинамики, химии атмосферы и водных объектов для оценок последствий интенсивных воздействий природного и техногенного характера. В них учтены новые версии разрабатываемых алгоритмов, параметризаций и постановок задач.
   1. Учитывая наличие неопределенностей при задании входной информации и неопределенностей, обусловленных неполнотой знаний о природе исследуемых процессов, необходимо иметь представление о качестве модели, т.е. о степени ее соответствия реальной физической системе, устойчивости и чувствительности решений к вариациям входных параметров. Особенно важна подобная информация в тех случаях, когда речь идет о моделировании ситуаций в атмосфере, связанных с катастрофическими событиями природного и антропогенного характера.

Следовательно, при математическом моделировании необходимо иметь алгоритмы, позволяющие описать подобные возмущения и оценить их воздействие на результат моделирования. В модели влияние возмущений можно учитывать через возмущения параметров, под которыми понимаются не только коэффициенты моделей процессов, но и начальные данные и граничные условия задачи.

Мы используем специальные методы теории возмущений, непосредственно связывающие вариации исследуемых характеристик с вариациями параметров. Примеры их построения для оценок вариаций функционалов с использованием сопряженных уравнений гидротермодинамики атмосферы и с усвоением данных мониторинга изложены в работе (Penenko et al. JAMT, 2019).

В тех случаях, когда по информации о функциях, описывающих состояние моделируемой системы, находящейся в экстремальных ситуациях, необходимо оценивать параметры модели, приводящие к такой ситуации, требуется решать обратные задачи. При этом численная модель обеспечивает описание дополнительных связей между параметрами, а искомые оценки её параметров получаются с помощью методов оптимизации или других алгоритмов решения обратных задач.

1.2. Для описания устойчиво стратифицированного пограничного слоя с охлаждением поверхности применена разработанная явная анизотропная алгебраическая модель напряжений Рейнольдса и вектора потока скаляра. С помощью модели проведены вычисления для исследования динамики устойчивого пограничного слоя по схеме известного тестового случая проекта GABLS1, но с более широкой областью устойчивости, где градиентное число Ричардсона больше единицы (). Модель включает воздействие гравитационных волн, позволяющее учесть поддержание импульса в условиях сильной устойчивости. Турбулентная кинетическая энергия (ТКЭ), скорость ее диссипации и дисперсия турбулентных пульсаций температуры и загрязняющих веществ находятся из трехпараметрической модели турбулентности, что минимизирует трудности в моделировании турбулентного переноса в устойчиво стратифицированной среде и уменьшает усилия, необходимые для численной реализации модели.



Рис. 2. Вертикальные профили компонент тензора турбулентных потоков импульса, вектора турбулентных потоков тепла и ТКЭ для случая GABLS1:

1 – настоящие вычисления, 2 – модель METEO–France ARPEGE [1], 3 – данные LES [2], которые включают сумму вкладов разрешаемых и подсеточных пульсационных характеристик.

Результаты расчетов атмосферного пограничного слоя с устойчивой стратификацией и охлаждением поверхности показывают (рис. 2), что распределения турбулентных потоков импульса и тепла, а также турбулентной кинетической энергии (ТКЭ), вычисленные по развитой трехпараметрической RANS-модели, более близки к данным вихреразрешающего метода LES, чем стандартная ТКЭ - схема.

Рассмотрена эффективность вихревого перемешивания импульса и тепла в устойчиво стратифицированном АПС. Путем численного моделирования прослеживается эволюция потокового числа Ричардсона, анализируется энергетика турбулентности, режимы *сильного* и *слабого* перемешивания. Потоковое число Ричардсона в уравнении баланса кинетической энергии турбулентности определяет отношение потока плавучести и порождения кинетической энергии турбулентности сдвигом скорости. В устойчивой стратификации поток плавучести отрицателен и кинетическая энергия турбулентных вихрей затрачивается на работу против архимедовых сил, конвертируясь в турбулентную потенциальную энергию. На рис. 2 показаны зависимости величины турбулентной потенциальной энергии , нормализованной на полную энергию  от градиентного числа Ричардсона, полученные при численном моделировании эволюции пограничного слоя атмосферы в сравнении с данными измерений в атмосфере, аэродинамической трубе и LES данными. Как и данные LES, результаты численного моделирования для устойчивого пограничного слоя (сплошная линия на рис. 3) показывают монотонную зависимость: отношение потенциальной энергии к полной энергии возрастает с ростом числа градиентного числа Ричардсона , стремясь к предельному значению .



Рис. 3. Величина *Ep*/*E* в зависимости от Ri*g*: 1, 2 и 3 – данные [3] измерений в атмосфере, аэродинамической трубе и LES, 4 – настоящие расчеты.

1.3. Изменение стратификации, а также введение слоя инверсии при прохождении холодного атмосферного фронта приводит к характерному изменению скорости фронта, которое находится в хорошем согласии с данными наблюдений и теоретическими представлениями по распространению гравитационных течений в атмосфере. Скорость фронта моделировалась с помощью негидростатической конечно-элементной модели динамики атмосферы. При моделировании использовались прямоугольные конечные элементы. Проведенные расчеты показали, что введение слоя инверсии приводит к интенсификации вертикальных скоростей и увеличению теплового потока, то есть к специфическим эффектам, которые существенно замедляют скорость распространения фронта, как над препятствием, так и над плоской орографией. В результате усиливается вовлечение теплого воздуха. Все это приводит со временем к существенному замедлению скорости распространения фронта. В этой связи были проведены также вычислительные эксперименты по влиянию стратификации на скорость фронта при обтекании здания специфической формы в условиях городской агломерации. Для нейтральной стратификации расчет показал правдоподобную форму изменения скорости в сравнении с имеющимися данными измерений в аэродинамической трубе.

1.4. Для разрабатываемой в лаборатории мезомасштабной модели гидротермодинамики атмосферы проводится адаптация модели фазовых переходов влажности из работы [4]. Модификация заключается в переходе от 4 компонентов влажности, учитываемых ранее в этой модели, к 6 (водяной пар, облачная вода, облачный лед, дождевая вода, снег, ледяная крупа/град). В рамках вариационного подхода для новых уравнений построены соответствующие разностные схемы. Продолжается работа по модификации программного кода модели динамики атмосферы и переноса примесей, позволяющего интерполировать входные и расчетные данные для вариантов модели с грубым разрешением сеточной области на сетки с более детальным разрешением. Для проведения сценариев моделирования для Байкальского региона отлажены процедуры перехода с сетки с горизонтальным шагом 10 км на сетку с шагом 5 км, и на сетку с шагом 1 км для одного из вариантов вложенной подобласти исследуемого региона. Совместно с Фалейчик Л.М. (ИПРЭК СО РАН) разработаны ГИС-проекты для визуализации данных расчетов процессов распространения примеси. Данные сценарных расчетов отображаются на подложках в виде цифровых моделей рельефа и на космоснимках исследуемой территории (Байкальский регион). Все расчеты на мезометерологической модели выполнялись с использованием параллельных алгоритмов реализации на вычислительных кластерах ССКЦ ИВМиМГ СО РАН.

1. Построены сценарии прямого и обратного моделирования для оценок экологических рисков, соответствующих условиям Западной Сибири и озера Байкал.
   1. Для оценки экологических рисков для озера Байкал, как объекта Мирового наследия, мы оцениваем вред, который атмосферное загрязнение приносит на акваторию озера. Оно распространяющееся от предприятий, большей частью расположенных в городах, и от пожаров, возникающих на Байкальской природной территории (БПТ). С этой целью мы решаем обратные задачи, позволяющие оценить зоны влияния окружающих территорий на озеро. Не менее актуально, в частности, в нынешнем году, когда ситуация от пожаров существенно ухудшила экологическое состояние городов, ставить и решать обратные задачи для городов и населенных пунктов БПТ с оценкой функций чувствительности целевых функционалов, определяющих качество атмосферы в них и приносимый в результате экологический вред биоте и населению с учетом специфики региона.

Для этих целей разработаны специальные версии сопряженной модели переноса примесей и специальные алгоритмы для решения обратных задач. В качестве входных данных в моделях с сопряженными уравнениями участвуют результаты расчетов по гидродинамической модели.

На рис.4 представлен результат решения задачи обратного моделирования, в которой оценивается изменение функции чувствительности целевого функционала, представляющего собой совокупный вред, наносимый населению города Иркутска в атмосферных условиях, определяемых гидродинамическим сценарием с преобладанием ветров юго-западного направления. Белыми кругами на рисунке обозначены населенные пункты, расположенные на БПТ. Диаметр кругов соотносится с количеством населения, проживающего в данном пункте.



Рис.4 Решение обратной задачи. Функция чувствительности для населения города Иркутска.

* 1. Для оценки рисков загрязнения воды в озере Байкал рассмотрены гипотетические сценарии развития туризма на озере. С этой целью использовались 3D модели гидротермодинамики и распространения примесей в озере. В условиях неопределенности с заданием условий эксперимента близкими к реальности, были выполнены сценарии моделирования, в которых рассматривались варианты с максимально возможным воздействием на озеро, когда источники примеси, объекты туристической отрасли, плотно располагались на всем побережье озера, включая острова. Все источники считались постоянно действующими, и все имели одинаковые мощности.

Рассматривался сценарий развития ситуаций в течение одного летнего туристического сезона. Система течений для задания гидродинамического сценария, рассчитывалась в «климатическом» варианте, когда в качестве граничных условий на поверхности задавался «климатический» ветер, рассчитанный по типизированным полям, а продолжительность действия и переходы от одного типа ветра к другому моделировались в соответствии с таблицами режимных характеристик методами Монте-Карло. Баланс тепла на поверхности рассчитывался по текущим данным и климатическим параметрам. По этим данным рассчитывались поля течений и температуры, а также концентрации примесей.

На рис.5 представлен фрагмент сценария, относящийся к концу летнего туристического сезона. В результате получилось, что в этом сценарии наиболее чистыми остались участки в середине северной котловины (синий цвет на рис.5). Основной вывод: имеет смысл озаботиться расположением туристических объектов с учетом специфики системы течений в озере.

|  |  |
| --- | --- |
|  | Рис. 5. Фрагмент сценария, относящийся к середине «климатического» сентября. Поле течений (см/сек) и концентрации примеси (усл. ед.). |

Проведение сценарных расчетов для оценок эффективности алгоритмов.

1. Рассмотрена задача усвоения данных для модели адвекции-диффузии. Усвоение данных осуществляется посредством выбора функции неопределенности, которая имеет смысл источника эмиссии. Ранее мы разработали прямой алгоритм усвоения данных со стабилизатором в целевом функционале, управляющем нормой функции неопределенности и ее пространственной производной. Теперь мы разработали новую версию алгоритма. В ней параметры модели усвоения находятся из сценария с известным источником (обучающей выборки). Оптимизация осуществляется с помощью генетического алгоритма. Найденные значения использовались в сценариях с неизвестными источниками выбросов (контрольный эксперимент). В рассмотренных примерах полученные параметры позволили улучшить результат усвоения данных.

**Результаты работ по проекту РНФ**

**Проект РНФ-17-71-10184** "Методы анализа и интерпретации изображений на основе решения обратных задач и задач усвоения данных с использованием систем основных и сопряженных уравнений моделей наблюдаемых процессов".

Руководитель – к.ф.-м.н. Пененко А. В.

В проекте разработаны алгоритмы решения обратных задач и задач усвоения данных для нелинейных многомерных моделей адвекции-диффузии-реакции по данным измерений типа изображений. Такие обратные задачи возникают, например, при исследовании химического состава атмосферы, когда измерению доступны только некоторые из взаимодействующих компонентов химической системы, информация о которых поступает в виде временных рядов, вертикальных профилей концентрации или спутниковых изображений полей концентрации. По этим данным требуется восстановить распределение концентраций ненаблюдаемых компонентов системы (элементов функции состояния ее математической модели) и определить характеристики неизвестных источников выбросов. Немаловажным в задачах оценки загрязнения атмосферы является обеспечение работы алгоритма в реальном времени. Другим рассматриваемым в проекте приложением является задача интерпретации данных микроскопии при исследовании процессов, протекающих в живых системах, когда на основе снимков полей концентраций определенных химических веществ (морфогенов) требуется определить области синтеза некоторых связанных с ними веществ или параметры математической модели изучаемых процессов. В подобных постановках в систему моделирования поступает относительно большое количество элементов информации (пикселей изображений), ценность каждого из которых для решения поставленных задач неизвестна.

В свете основного направления современного развития вычислительных систем особый интерес представляют алгоритмы, которые легко отображаются на параллельные вычислительные архитектуры. Примерами могут служить методы расщепления для решения прямых задач и ансамблевые методы усвоения данных. Поэтому в проекте к выбранным задачам применяется идея построения алгоритмов решения обратных задач, предложенная Г.И. Марчуком в 1964 г. Она состоит в сведении обратной задачи к системе квазилинейных уравнений с матрицей, определяемой набором решений сопряженных уравнений модели, соответствующих конечному числу различных линейных функционалов от функции состояния, с последующим решением полученной системы. Сопряженные задачи позволяют связать вариацию значения линейных функционалов от функции состояния с вариацией параметров модели и могут решаться параллельно. Для работы с изображениями высокого разрешения, где значение каждого пикселя является результатом измерения, вычислительных мощностей для непосредственного применения подобного подхода к каждому пикселю изображения может быть недостаточно, да и неизвестная априори ценность каждого элемента изображения говорит в пользу того, что вычислительные ресурсы необходимо расходовать более целенаправленно. С этой целью в проекте использована идея о рассмотрении некоторого небольшого набора “ключевых особенностей” изображения вместо самого исходного изображения. Выбор “ключевых особенностей” соответствует выбору системы функций в пространстве результатов измерений, на которые будут предварительно проецироваться исходные изображения для последующей обработки полученных проекций.

В соответствии с этими идеями, на основе ансамбля решений сопряженных уравнений моделей адвекции-диффузии-реакции различной пространственной размерности, построены операторы чувствительности, позволяющие на основе обратной задачи, сформулированной в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений, получить семейство квазилинейных операторных уравнений, зависящих от выбора функций предварительного проектирования данных измерений. Такая формулировка обратной задачи открывает доступ к широкому кругу известных методов решения нелинейных операторных уравнений. Кроме того, представление обратной задачи в виде операторного уравнения позволяет использовать методы анализа операторов, например, спектральные. В результате такого анализа возможно, например, оценить, какая часть неизвестного может быть определена на основе имеющихся данных измерений.

Для решения операторных уравнений в проекте применен метод типа Ньютона-Канторовича. Вследствие некорректности и нелинейности обратной задачи, получающаяся матрица оператора чувствительности, во-первых, плохо обусловлена, и, во-вторых, известна неточно. Поэтому для её обращения в методе Ньютона-Канторовича использован подход на основе r-псевдообратных матриц с постепенным увеличением количества используемых компонентов сингулярного разложения по мере убывания невязки уравнения. В алгоритме осуществляется сингулярное разложение матриц с размерностью, равной квадрату минимума между количеством функций проектирования и неизвестных. Разработанный алгоритм, хотя и является итерационным, но в нем значительная часть вычислений проводится параллельно, что и позволяет получить выигрыш по времени счета. Проведено численное сравнение разработанного алгоритма с вариационным (градиентным). В численных экспериментах было получено, что при использовании определенных наборов функций проектирования, разработанный алгоритм превосходит градиентный по точности и скорости расчетов.

Способ построения ансамбля решений сопряженных уравнений, особенно в многомерном случае является ключевым фактором успеха применения разработанного алгоритма. С одной стороны, использование слишком малого количества функций проектирования приведет к потере алгоритмом большей части содержащейся в данных информации, а с другой - увеличение количества используемых функций проектирования может приводить к увеличению количества локальных стационарных точек алгоритма (не являющихся решением исходной задачи). В проекте рассматривались различные подходы к оптимизации вычисляемого ансамбля при сохранении его информативности для данной обратной задачи. Первый подход основывался на выборе из данных измерений “гладких” компонент. Второй подход состоял в решении задачи на базисе из первых левых сингулярных векторов оператора чувствительности задачи, вычисленном на начальном приближении. Третий подход, который показал в проведенных численных экспериментах с многомерными моделями высокую эффективность, состоял в выборе системы проектирования из некоторого базиса на основе максимальной проекции начальной невязки обратной задачи.

Основной сложностью при решении обратных и некорректных задач является работа с зашумленными данными, так как в силу некорректности, малые возмущения во входных данных могут привести к большим возмущениям в получаемом решении. Для преодоления этого эффекта применяются методы регуляризации. При использовании итерационных алгоритмов наиболее перспективной представляется итеративная регуляризация, когда алгоритм решения задачи останавливается на определенной итерации. Для поиска момента остановки использован принцип невязки, состоящий в том, что алгоритм останавливается при достижении невязкой заданного уровня шума. В проведенных численных экспериментах было установлено, что при наличии оценки нормы проекции шума на базис проектирования, разрабатываемый алгоритм может работать с зашумленными данными, и по мере уменьшения шума, точность восстановления увеличивается. Этот результат, естественный для корректных задач, является нетривиальным для некорректных. Кроме того, устойчивость алгоритма может быть увеличена за счет использования априорной информации о решении, например, о его положительности.

В ходе выполнения проекта алгоритм был реализован и протестирован для шкалы моделей адвекции-диффузии-реакции различной пространственной размерности и с различными моделями реакции. В частности, он был протестирован на реальных данных в задаче об определении области синтеза гипотетического (ненаблюдаемого) морфогена в модели регуляции обновляемой зоны в биологической ткани по снимкам с микроскопа полей концентраций других морфогенов. Кроме того, алгоритм был протестирован на реалистичном сценарии идентификации источников загрязнения по данным мониторинга химического состава атмосферы в городе.

Разработанный алгоритм интерпретации изображений в терминах источников модели адвекции-диффузии-реакции показал свою работоспособность и в потоковом режиме на примере задачи оценки химического состава атмосферы и идентификации источников загрязнения в модели переноса и трансформации загрязнений в атмосфере, то есть в режиме усвоения данных. В этой постановке новые данные измерений поступают в определенные моменты модельного времени.

**Результаты работ по проектам РФФИ**

Проект РФФИ 17-01-00137 "Вариационный подход для решения задач охраны окружающей среды городских агломераций".

Руководитель – д.ф.-м.н. Пененко В. В.

Для исследования климато-экологических процессов, природоохранного прогнозирования и проектирования в городских агломерациях разработана согласованная в вариационном смысле технология, позволяющая решать широкий спектр прямых и обратных задач. Основа – совместная работа моделей и данных наблюдений. Здесь существенным пунктом является принятие концепции «гибкости», то есть отказ от «жестких» формулировок путем включения в модели процессов и в модели наблюдений дополнительных искомых функций - функций неопределенности. На основе этой парадигмы разработаны последовательные методы усвоения данных с применением сопряженных задач; методы оценок чувствительности моделей и моделируемых процессов к изменениям параметров и входных данных; построены смешанные (прямые и итерационные) вариационные алгоритмы усвоения данных атмосферной химии с различной гладкостью функций неопределенности в моделях процессов и др. Исследования проводились с помощью комплекса оригинальных моделей гидродинамики и распространения примесей различной степени сложности. Сценарные расчеты выполнены на Сибирском суперкомпьютерном центре СО РАН.

На примере Красноярска с помощью методов математического моделирования исследована изменчивость качества атмосферы в городских агломерациях в зависимости от сочетания климатических, погодных и антропогенных факторов. С этой целью разработаны специальные версии комплекса базовых моделей, учитывающие специфические условия региона. При организации сценариев моделирования были рассмотрены характерные для рассматриваемой территории Красноярского края варианты развития метеорологических ситуаций и распространения примесей, включающие случаи с инверсиями в летних и зимних условиях. В сценариях учитывалось круглогодичное наличие открытой водной поверхности в нижнем бьефе Красноярского водохранилища. Основные выводы: поскольку причинами инверсий являются неустранимые геофизические факторы, существенного улучшения качества атмосферы в городе можно добиться только снижением и регулированием выбросов.

**РФФИ 17-29-05044** Мониторинг и оценка влияния опасных природных явлений (лесные и торфяные пожары) и антропогенных источников на качество атмосферы Байкальского региона на основе комплексных дистанционных и наземных локальных измерений и математического моделирования

Руководитель - д.г.н. Ходжер Т.В. (ЛИН СО РАН)

Выполнено моделирование процессов гидротермодинамики региона с помощью трехмерной нестационарной негидростатической модели; моделирование процессов распространения примесей на фоне гидродинамических сценариев для летнего периода с постоянно действующими источниками, представляющими ТЭЦ и котельные, расположенные в БПТ и другие варианты сценариев по распространению дымовых шлейфов от пожаров.

Рассмотрены постановки и решения задач обратного моделирования с использованием сценариев рассчитанного гидродинамического фона.

### **Проект РФФИ** [**19-07-01135**](https://kias.rfbr.ru/) Разработка алгоритмов на основе ансамблей сопряженных функций для нахождения коэффициентов в моделях продукции-деструкции по данным точечных измерений

Руководитель – к.ф.-м.н. Пененко А. В.

За отчетный период реализованы алгоритмические конструкции, необходимые для решения обратных коэффициентных задач для моделей типа продукции-деструкции с данными точечных измерений. В частности, построены согласованные в смысле тождества Лагранжа дискретно-аналитические численные схемы для операторов чувствительности обратных задач в дискретной форме. На основе операторов чувствительности реализован алгоритм решения обратной коэффициентной задачи, который состоит в получении семейства квазилинейных матричных уравнений с последующим их решением методами типа Ньютона-Канторовича. Проведены отладка и тестирование алгоритмов на моделях различной сложности.

**Публикации**

**Издания, включенные в реферативную базу данных WoS**

1. Penenko A.V., Khassenova Z.T., Penenko V.V., Pyanova E.A. Numerical study of a direct variational data assimilation algorithm in Almaty city conditions // EURASIAN JOURNAL OF MATHEMATICAL AND COMPUTER APPLICATIONS, 2019. V. 7 Iss. 1, P. 53-64 DOI: 10.1007/978-3-030-11539-5\_43
2. Alexey Penenko, Vladimir Penenko, Elena Tsvetova, Zhadyra Mukatova Consistent Discrete-Analytical Schemes for the Solution of the Inverse Source Problems for Atmospheric Chemistry Models with Image-Type Measurement Data. [International Conference on Finite Difference Methods](https://link.springer.com/conference/fdm) FDM 2018: [Finite Difference Methods. Theory and Applications](https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-11539-5) pp 378-386. **DOI:** 10.1007/978-3-030-11539-5\_43
3. V.V. Penenko., A.V. Penenko., E.A. Tsvetova., A.V. Gochakov Methods for Studying the Sensitivity of Air Quality Models and Inverse Problems of Geophysical Hydrothermodynamics. March 2019, Volume 60, [Issue 2](https://link.springer.com/journal/10808/60/2/page/1), pp 392–399. DOI: 10.1134/S0021894419020202
4. Penenko A.V. A Newton–Kantorovich Method in Inverse Source Problems for Production-Destruction Models with Time Series-Type Measurement Data// [Numerical Analysis and Applications](https://link.springer.com/journal/12258). January 2019, Volume 12, [Issue 1](https://link.springer.com/journal/12258/12/1/page/1), pp 51–69.

DOI: 10.1134/S1995423919010051.

# A.F. Kurbatskii, L.I. Kurbatskaya Investigation of a stable boundary layer using an explicit algebraic model of turbulence. May 2019, Volume 26, [Issue 3](https://link.springer.com/journal/11510/26/3/page/1), pp 335–350. DOI: 10.1134/S086986431903003X.

1. Elza A. Pyanova; Vladimir V. Penenko; Larisa M. Faleychik Numerical study of pollutants dispersion in urban atmosphere in warm and cold seasons (Krasnoyarsk city as an example)// Proc. of SPIE. 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics; Novosibirsk; Russian Federation; 1 -5 July 2019, 11208C. DOI: 10.1117/12.2541010
2. A.V. Penenko, A. V. Gochakov, P. N. Antokhin Numerical study of an algorithm for air pollution sources identification with in situ and remote sensing measurement data // Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 112085B (18 December 2019) DOI: 10.1117/12.2540901
3. Penenko V.V., Tsvetova E.A. Assessment of possible transboundary transport: direct and inverse problems // Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 112086D (18 December 2019) DOI: 10.1117/12.2541738
4. M. S. Yudin Verification of a FEM model of front evolution with varying thermal stratification//Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 112087J (18 December 2019) DOI: 10.1117/12.2540624
5. Lyudmila I. Kurbatskaya; Albert F. Kurbatskii Structure of stable stratified boundary layers: study with of nonlocal turbulence model // Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics 1-5 July 2019: Atmospheric Physics, 112088D (18 December 2019). DOI: 10.1117/12.2541288

**Scopus (не включенные в WoS)**

1. [Alexey Penenko](https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S021972001940002X), [Ulyana Zubairova](https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S021972001940002X) [Zhadyra Mukatova](https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S021972001940002X)  and [Sergey Nikolaev](https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S021972001940002X) Numerical algorithm for morphogen synthesis region identification with indirect image-type measurement data. [Journal of Bioinformatics and Computational Biology](https://www.worldscientific.com/worldscinet/jbcb)[Vol. 17, No. 01, 1940002 (2019)](https://www.worldscientific.com/toc/jbcb/17/01). DOI: <https://doi.org/10.1142/S021972001940002X>.

# A V Penenko, Zh S Mukatova and A B Salimova. Numerical analysis of an inverse coefficient problem for a chemical transformation model //IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 386 (2019) 012041 DOI: 10.1088/1755-1315/386/1/012041

1. V V Penenko and E A Tsvetova Inverse problems for the study of climatic and ecological processes under anthropogenic influences // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 386 (2019) 012036 DOI: 10.1088/1755-1315/386/1/012036
2. E G Kablukova , V A Ogorodnikov , S M Prigarin and M S Yudin Stochastic quasi-Gaussian models of atmospheric clouds // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 386 (2019) 012043 DOI: 10.1088/1755-1315/386/1/012043
3. Alexey Penenko, Zhadyra Mukatova, Akzhan Salimova Numerical solution of the coefficient inverse problem for a production-destruction model with various adjoint ensemble designs // International Asian School-Seminar Optimization Problems of Complex Systems (OPCS), IEEE, 2019 doi: 10.1109/opcs.2019.8880222
4. Penenko, A. & Mukatova, Z. scenario approach for the optimization of regularization parameters in the direct variational data assimilation algorithm// 2019 15th International Asian School-Seminar Optimization Problems of Complex Systems (OPCS), IEEE, 2019 doi: 10.1109/opcs.2019.8880181

**РИНЦ**

1. Пененко А.В. Алгоритмы на основе ансамблей сопряженных функций для обратного моделирования процессов переноса и трансформации примесей в атмосфере. //Сб. трудов CITES-19 «Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде» 2019. С. 259-262. eLIBRARY ID: 39204617
2. [Пененко А.В.](https://elibrary.ru/author_items.asp?authorid=128681), Мукатова Ж.С., Салимова А.Б. Численное решение обратных задач для моделей трансформации примесей. /Сб. трудов CITES-19 «Международнаяй молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде». 2019. С. 266-268. eLIBRARY ID: 39204620
3. Пененко В.В., Пененко А.В., Цветова Е.А., Гочаков А.В [Методы исследования чувствительности модели качества атмосферы и обратные задачи геофизической гидротермодинамики](https://elibrary.ru/item.asp?id=37248725). //[Прикладная механика и техническая физика](https://elibrary.ru/contents.asp?id=37248703). 2019. Т. 60. [№ 2 (354)](https://elibrary.ru/contents.asp?id=37248703&selid=37248725). С. 238-246. eLIBRARY ID: 37248725 DOI: [10.15372/PMTF20190220](https://doi.org/10.15372/PMTF20190220)
4. Пененко А.В. [Метод Ньютона-Канторовича для решения обратных задач идентификации источников в моделях продукции-деструкции с данными типа временных рядов](https://elibrary.ru/item.asp?id=37062941).// [Сибирский журнал вычислительной математики](https://elibrary.ru/contents.asp?id=37062936). 2019. Т. 22. [№ 1](https://elibrary.ru/contents.asp?id=37062936&selid=37062941). С. 57-79. eLIBRARY ID: 37062941DOI: [10.15372/SJNM20190105](https://doi.org/10.15372/SJNM20190105)
5. Penenko A., Mukatova Z., Zubairova U., Nikolaev S. [Numerical algorithm for morphogen synthesis region identification with indirect image-type measurement data](https://elibrary.ru/item.asp?id=38699299). [Journal of Bioinformatics and Computational Biology](https://elibrary.ru/contents.asp?id=37430484). 2019. т. 17. [№ 1](https://elibrary.ru/contents.asp?id=37430484&selid=38699299). С. 1940002. eLIBRARY ID: 38699299 DOI: [10.1142/S021972001940002X](https://doi.org/10.1142/S021972001940002X)
6. Penenko A.V. A [Newton–Kantorovich method in inverse source problems for production-destruction models with time series-type measurement data](https://elibrary.ru/item.asp?id=38680266)// [Numerical Analysis and Applications](https://elibrary.ru/contents.asp?id=38672076). 2019. Т. 12. [№ 1](https://elibrary.ru/contents.asp?id=38672076&selid=38680266). С. 51-69. eLIBRARY ID: 41249983 DOI: [10.33764/2618-981X-2019-4-1-121-125](https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-4-1-121-125)
7. Пененко А.В. [Реализация алгоритмов на основе ансамблей сопряженных функций для обработки данных мониторинга](https://elibrary.ru/item.asp?id=41249983). [Интерэкспо Гео-Сибирь](https://elibrary.ru/contents.asp?id=41249964). 2019. Т. 4. [№ 1](https://elibrary.ru/contents.asp?id=41249964&selid=41249983). С. 121-125. eLIBRARY ID: 41249983 DOI: [10.33764/2618-981X-2019-4-1-121-125](https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-4-1-121-125)
8. Пененко В.В., Цветова Е.А. [Обратные задачи для исследования климато-экологических процессов в условиях антропогенных воздействий](https://elibrary.ru/item.asp?id=39204608) // В сборнике: [CITES '2019](https://elibrary.ru/item.asp?id=39204349) Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде. 2019. С. 235-239.eLIBRARY ID: 39204608
9. Пененко В.В. [Прямые и обратные задачи для оценок возможных трансграничных переносов](https://elibrary.ru/item.asp?id=41264527) // [Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем](https://elibrary.ru/contents.asp?id=41264478). 2019. Т. 1. [№ 4](https://elibrary.ru/contents.asp?id=41264478&selid=41264527). С. 281-285. eLIBRARY ID: 41264527DOI: [10.23885/2500-395X-2019-1-4-281-285](https://doi.org/10.23885/2500-395X-2019-1-4-281-285)
10. Цветова Е.А. [Математическое моделирование гидротермодинамики вод озера Байкал: результаты, проблемы и перспективы](https://elibrary.ru/item.asp?id=41264528) [Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем](https://elibrary.ru/contents.asp?id=41264478). 2019. Т. 1. [№ 4](https://elibrary.ru/contents.asp?id=41264478&selid=41264528). С. 286-290. eLIBRARY ID: 41264528 DOI: [10.23885/2500-395X-2019-1-4-286-290](https://doi.org/10.23885/2500-395X-2019-1-4-286-290)
11. Пьянова Э.А., Пененко В.В., Фалейчик Л.М. Летний сценарий моделирования рассеивания примесей от источников выбросов в центральной экологической зоне Байкальской природной территории // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 4. № 1. С. 126-133. DOI: 10.33764/2618-981Х-2019-4-1-126-133,
12. Пьянова Э.А., Пененко В.В., Фалейчик Л.М. Использование математического моделирования для оценки рисков атмосферного переноса загрязнений на акваторию Байкала // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2019. Т. 1. № 4. С. 261-266. DOI: 10.23885/2500-395X-2019-1-4-261-266,
13. Курбацкая Л.И. Математическое моделирование проникающей турбулентной и термической конвекции и рассеяние загрязнений над городом и его окрестностями. // Журнал Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2019. Т.1, Номер 4, С. 234-240. DOI: [10.23885/2500-395X-2019-1-4-234-240](https://doi.org/10.23885/2500-395X-2019-1-4-234-240).
14. Курбацкая Л.И. Моделирование проникающей турбулентной конвекции и рассеяние загрязнений в термически устойчиво стратифицированной среде. // Журнал ИНТЕКЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. 2019. Т. 4. Номер 1. С. 90-98. eLIBRARY ID: 41249979 DOI: 10/33764/2618-981X-2019-4-1-90-98
15. Юдин М.С. Расчет параметров гравитационных течений в атмосфере с помощью модели конечных элементов.// Сборник трудов конференции Международной молодежной школы и конференции по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде. 2019. С. 49-52. eLIBRARY ID: 39204522.
16. Гочаков А.В., Пененко А.В., Колкер А.Б., Антохин П.Н. [Описание урбанизированной поверхности с использованием геопространственных данных для задач моделирования и оценки качества воздуха](https://elibrary.ru/item.asp?id=41376583) В сборнике: [Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2019)](https://elibrary.ru/item.asp?id=41376495) Сборник трудов всероссийской конференции с международным участием. 2019. С. 344-348. eLIBRARY ID: 41376583

**Участие в конференциях и совещаниях**

1. IV МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ «ГОРОДСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ» 04-05 АПРЕЛЯ 2019 ГОДА, Г. НОВОСИБИРСК (РОССИЯ) (Пененко В.В., Пененко А.В.)
2. EGU General Assembly 2019 Vienna | Austria | 7–12 April 2019 1 доклад (Пененко А.В.)
3. 15-й Международный научный конгресс "Интерэкспо Гео-Сибирь" и Международная научная конференция "Дистанционные методы зондирования земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология", Новосибирск, 17–26 апреля 2019 г. – 6 докладов (Пененко В. В., Пененко А. В., Курбацкая Л. И., Пьянова Э. А., Цветова Е. А., Юдин М. С.).
4. Всероссийская конференция и школа для молодых ученых, посвященные 100-летию академика Л.В.Овсянникова "Математические проблемы механики сплошных сред" Новосибирск, 13-17 мая, 2019- 4 доклада (Пененко В. В., Пененко А. В., Пьянова Э. А., Цветова Е. А.)
5. International event on Computational Information Technologies for Environmental Sciences CITES-2019 (27 May - 6 June 2019, Moscow, Russia). – 2 доклада, из них один приглашенный (Пененко В.В., Цветова Е.А ; Пененко А.В.).
6. XXV международный cимпозиум “Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы” 30 июня - 5 июля 2019 года, Новосибирск- 4 доклада, 1 приглашенный (Пененко В.В., Цветова Е.А.; Пененко А.В.; Пененко В.В. Пьянова Э.А.)
7. Международная конференция "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики". 1-5июля 2019 г. Новосибирск . – 6 докладов, из них два пленарных (Пененко В. В., Пененко А. В., Курбацкая Л. И., Пьянова Э. А., Цветова Е. А., Юдин М. С.).
8. Международная конференция «Математика в приложениях» в честь 90-летия С.К.Годунова, 4-10 августа 2019, г. Новосибирск – 2 доклада (Пененко В.В., Цветова Е.А., Пененко А.В.)
9. Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. 19-24 августа 2019 г. Уфа . – 2 доклада (Курбацкая Л.И.).
10. 15-th International Asian School-Seminar «Optimization problems of complex systems» August 26-30, 2019, Academgorodok, Novosibirsk, Russia -1 доклад (Пененко А.В.)
11. Одиннадцатая международная молодёжная научная школа - конференция "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, Академгородок, 26 августа – 4 сентября 2019 года – 2 пленарных доклада, (Пененко В.В., Пененко А.В.).
12. VII Всероссийская конференция **«**Экология. Экономика. Информатика. Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем (САМЭС)»  под эгидой объединенной конференции «Экология. Экономика. Информатика» 9-14 сентября 2019 г. Абрау-Дюрсо. – 3 доклада (Пененко В.В., Цветова Е.А., Пьянова Э.А., Курбацкая Л.И.).
13. XVIII Всероссийская конференция-школа молодых исследователей "Современные проблемы математического моделирования" 16-21 сентября 2019 г. Абрау-Дюрсо. – 2 доклада, из них один приглашенный (Пененко В.В., Цветова Е.А.).
14. Всероссийская конференция "XXXV Сибирский теплофизический семинар, посвящённый 75-летию д.т.н., профессора В.И. Терехова 27–29 августа 2019 г. Новосибирск, Россия. – 1 доклад (Курбацкая Л.И.).
15. XVI Рабочая группа "Аэрозоли Сибири" 26-29 ноября 2019 г. Томск. – 5 докладов, из них один приглашенный (Пененко В. В., Пененко А. В., Пьянова Э. А., Цветова Е. А., Юдин М. С.).
16. "Quasilinear Equations, Inverse Problems and their Applications", Dolgoprudny, Russia, December 2–4, 2019 – 1 доклад Пененко А.В.

**Участие в организации научных мероприятий**

**Участие в программных и организационных комитетах**

1. Пененко В. В.:

– член программного комитета Одиннадцатой международной молодёжной научной школы «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач» Новосибирск, Академгородок, 26 августа−4 сентября 2019.

– член программного комитета Eurasian Conference on Applied Mathematics Novosibirsk, Akademgorodok, Russia, 26 - 30 August, 2019.

– член программного комитета Международной конференции "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики" (с 1 по 5 июля 2019). Новосибрск

– член программного комитета XXV Международного Cимпозиума “Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы” 30 июня - 5 июля 2019 года, Новосибирск.

– член программного комитета XXVI конференции "Аэрозоли Сибири"25-29 ноября 2019 года, Томск.

– член программного комитета XVIII Всероссийской Конференции-школы молодых исследователей "Современные проблемы математического моделирования"

– член программного комитета International event on Computational Information Technologies for Environmental Sciences CITES-2019 (27 May - 6 June 2019, Moscow, Russia)

2. Пененко А. В.:

– член программного и организационного комитета одиннадцатой международной молодёжной научной школы «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач» Новосибирск, Академгородок, 26 августа−4 сентября 2019.

– член программного комитета Eurasian Conference on Applied Mathematics Novosibirsk, Akademgorodok, Russia, 26 - 30 August, 2019.

3. Пьянова Э. А.:

– член организационного комитета Одиннадцатой международной молодёжной научной школы «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач» Новосибирск, Академгородок, 26 августа−4 сентября 2019.

– член организационного комитета Eurasian Conference on Applied Mathematics Novosibirsk, Akademgorodok, Russia, 26 - 30 August, 2019.

– член организационного комитета Международной конференции "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики" (с 1 по 5 июля 2019). Новосибрск

4. Юдин М. С.:

– член организационного комитета Международной конференции "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики" (с 1 по 5 июля 2019). Новосибирск.

**Международные научные связи**

В рамках некоммерческого партнерства лаборатория ММГППС участвует в междисциплинарном проекте Рan Еurasium Experiment (PEEX, Пан-Евразийский Эксперимент) институтов Европы, России, Китая.

**Итоговые данные по лаборатории**

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 10

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 16

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 16

Доклады на конференциях 45, из них 8 пленарных и приглашенных

Участников оргкомитетов конференций – 13

**Кадровый состав**

1. Пененко В. В. зав. лаб. д.ф.-м.н.

2. Цветова Е. А. в.н.с. к.ф.-м.н.

3. Юдин М. С. с.н.с.

4. Курбацкая Л. И. с.н.с.

5. Пененко А. В. с.н.с. к.ф.-м.н.

6. Пьянова Э. А. н.с. к.ф.-м.н.

7. Иванова Г. И. техник (0,75)

**Педагогическая деятельность**

Пененко В. В. – профессор НГУ

Пененко А. В. – почасовик НГУ

**Защита дипломов**

1. Салимова А.Б., НГУ, бакалавр, НГУ, руководитель Пененко А.В.

**Студенты**

1. Мукатова Ж.С. 1 курс магистратуры, НГУ, руководитель Пененко А.В.
2. Коноплева В.С., 4 курс НГУ, руководитель Пененко А.В.
3. Латышенко У. , 4 курс НГУ, руководитель Пененко А.В.
4. Голенко П., 5 курс НГУ, руководитель Пененко А.В.