

**Лаборатория математического моделирования
гидродинамических процессов в природной среде**

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

Важнейшие достижения

Обнаружение угловых структур в 3d-массивах с использованием масштабируемых масок

Д.ф.м.-н. Казанцев И. Г.

Проведены теоретические исследования масок (образцы для сравнений, или эталоны), моделирующих угловые структуры для их обнаружения на трехмерных изображениях при использовании в традиционном методе скользящих окон. Этот метод основывается на согласованной фильтрации и многократных вычислениях свертки маски с текущей окрестностью отдельного элемента массива. Одним из актуальных приложений является проблема распознавания лиц, где метод имеет конкретное применение при поиске доминантных (опорных) точек.

Ранее нами были сконструированы масштабируемые маски для выделения угловых конструкций на двумерных изображениях. В этой работе показано обобщение угловых масок на трехмерный случай. Свойство масштабируемости, состоящее в иерархии подматриц, дающей возможность построения матриц большего размера простым повторением самоподобных элементов, удалось распространить на трехмерный случай. Это отличает новые маски от использовавшихся традиционных, элементы маски которых зависят от размера матрицы.

Излагается общий подход к конструированию масок для различных телесных углов. Этот подход помогает разрабатывать иерархические вычисления трехмерных данных с целью ускорения. Приводится сравнительный анализ коэффициентов усиления шума традиционных угловых детекторов (Кирш, Робинсон) и новых масок.

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Kazantsev, I. G., Mukhametzhanova, B. O., Iskakov, K. T. Detection of the corner structures in 3D arrays using scalable masks // Sib. Electron. Math. Rep. 2021. V. 18, No 1. P. 61–71. DOI: 10.33048/semi.2021.18.006 (Scopus, Q2).
2. Kazantsev, I. G., Mukhametzhanova, B. O., Suvorovsky, O. Yu. Corner detection in images and scalable masks // IEEE International conference on smart information systems and technologies, Nur-Sultan (Kazakhstan), Apr. 28–30, 2021. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9465940> DOI: 10.1109/SIST50301.2029465940 (Scopus).
3. Казанцев И. Г. Масштабируемые маски детектора угловых точек на трехмерных изображениях // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 4., № 1. С. 72–78. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1 (РИНЦ).

Результаты исследований представлены на конференциях:

1. 2021 IEEE International conference on smart information systems and technologies, Nur-Sultan (Kazakhstan), Apr. 28–30, 2021.
2. Научная конференция "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология" в рамках 17-го Международного научного конгресса "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 19–21 мая 2021 г.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершенным в 2021 г.
в соответствии с планом НИР института**

Проект НИР "Математические модели физики атмосферы, гидросферы, экологии и методы решения прямых и обратных задач с усвоением данных, задач дистанционного зондирования Земли для исследования климата, природных и техногенных воздействий на окружающую среду"

Номер государственной регистрации НИР 0251-2021-0003.

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

Раздел 1

Этап 2021 г.

1.1. Разработка численных методов для развития комплекса мезорегиональных моделей гидротермодинамики атмосферы и охраны окружающей среды с учетом природных и техногенных воздействий.

В рамках развития общей концепции природоохранного прогнозирования и проектирования выполнен комплекс исследований из нескольких составляющих, отвечающих основным компонентам направления математического моделирования: построение алгоритмов, разработка моделей, реализация на современных вычислительных средствах и решение фундаментальных и прикладных задач разработанными средствами.

Процессы в окружающей среде, подверженной воздействиям природных и антропогенных факторов, происходят в различных составляющих Земной системы: в атмосфере, гидросфере, на поверхности Земли, в верхних слоях почвы и т. д. Эти процессы описываются моделями (системами уравнений), которые должны быть согласованы между собой. Объединение всех этих моделей в единую систему мы осуществляем на основе вариационных принципов в формулировках со слабыми ограничениями, допуская наличие неопределенностей во всех объектах системы моделирования и в данных наблюдений. Последние включаются в систему моделирования с помощью методов усвоения данных. В настоящее время основной объем данных от действующих систем мониторинга поступает об атмосфере и о поверхности Земли. Поэтому модели процессов и модели наблюдений при решении задач о Земной системе выступают в роли инструментов пространственно-временной экстраполяции-интерполяции для оценок функций состояния и параметров при решении прямых и обратных задач во всей системе в целом.

Разнообразие постановок задач обратного моделирования (например, обратных задач идентификации источников загрязнений, задач усвоения данных мониторинга, задач оценки информативности данных измерений), возникающих при решении задач природоохранного прогнозирования и проектирования, требуют разработки общего подхода к их решению и анализу. Такой подход предоставляют алгоритмы обратного моделирования на основе операторов чувствительности. В рамках этого подхода для обратной задачи строится семейство квазилинейных операторных уравнений, содержащих ее решение. Квазилинейная структура способствует как решению, так и анализу получающихся уравнений. Для построения операторов чувствительности требуется решать ансамбль независимых сопряженных уравнений с различными "правыми частями". Разработанные методы реализуют созданные алгоритмы.

В лаборатории развивается комплекс моделей разной степени сложности для решения природоохранных задач. В рамках проекта продолжилась работа по отладке и исследованию

свойств базовой мезомасштабной модели гидротермодинамики атмосферы, которая является основой для решения прямых и обратных задач по моделированию качества атмосферы. Модель предусматривает возможность построения версий с различными пространственными разрешениями и настройкой на регионы.

Сценарные расчеты на базе разрабатываемой модели проводились для части территории Новосибирской обл. и для Байкальского региона. В обоих случаях модельная территория представляет собой сушу с различными видами шероховатости подстилающей поверхности, значительную часть рассматриваемой территории занимает водоем, который вносит дополнительную термическую неоднородность подстилающей поверхности. Территории различаются масштабами и сложностью орографии. Расчеты выполнялись на ССКЦ СО РАН.

1.2. Тестирование разрабатываемого трехпараметрического RANS-приближения моделирования турбулентности применительно к пограничному слою для его нейтрального, неустойчивого и устойчивого состояний.

Структура пограничного слоя атмосферы зависит от атмосферной устойчивости (эффекты плавучести) и механизма генерации турбулентности. При неустойчивой стратификации (при нагревании поверхности) плавучесть способствует увеличению турбулентного перемешивания. В условиях устойчивой стратификации, которая формируется при охлаждении поверхности, турбулентность генерируется сдвигом и разрушается под действием отрицательной плавучести и вязкости. Разнонаправленность действия эффектов плавучести и сдвига ведет к ослаблению интенсивности турбулентности по сравнению с нейтральной стратификацией и конвективным перемешиванием. При использовании RANS-схемы турбулентности делается акцент на анализе возможности RANS-метода при описании некоторых особенностей вихревого перемешивания импульса и тепла в условиях сильно устойчивой стратификации в пограничном слое атмосферы. Одна из особенностей связана с возникновением перемежающейся турбулентности, характеризующейся короткими периодами турбулентного состояния (всплесками) и промежуточными периодами относительно слабых колебаний.

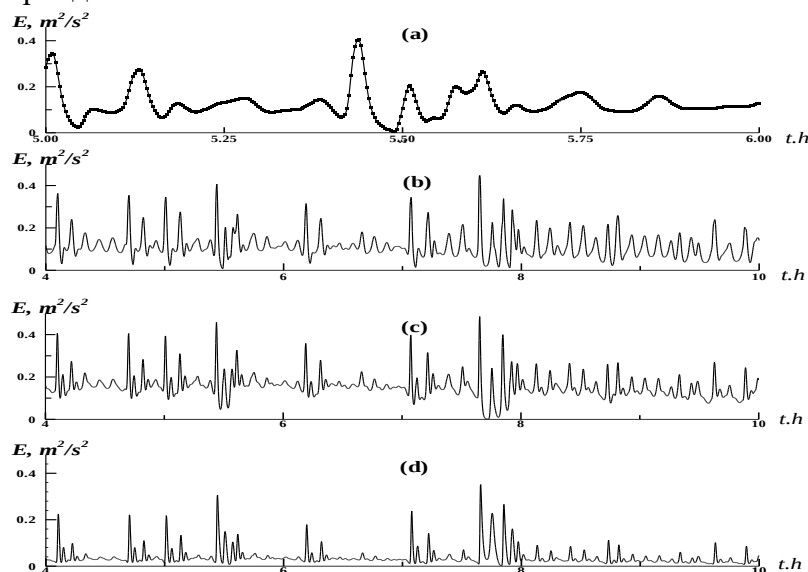


Рис. 1 – Зависимость кинетической энергии турбулентности от времени в сильно устойчивом пограничном слое на различных расстояниях от поверхности, полученная при численном моделировании по RANS-схеме (шаг интегрирования по времени 1 с, шаг сетки по вертикали 3.125 м): $z = 10,9375$ м (а) (точками обозначены моменты записи с интервалом 10 с в течение часа); $z = 10,9375$ м (б), $z = 7,812575$ м (в), $z = 4,6825$ м (г)

Представленные результаты вычислительного эксперимента показывают возможность использования трехпараметрической RANS-схемы к воспроизведению перемежающейся турбулентности как вблизи поверхности, так и "поднятой" турбулентности, генерируемой струйным течением низкого уровня в устойчивом пограничном слое атмосферы. На рис. 1 показана перемежающаяся турбулентность вблизи поверхности, которая описывается зависимостью кинетической энергии турбулентности от времени.

Анализ результатов также показал, что вертикальный профиль турбулентного числа Прандтля, полученный по трехпараметрической RANS-схеме, учитывающей влияние внутренних гравитационных волн для поддержания импульса в условиях сильной устойчивости, согласуется с результатами LES- и DNS моделирования. Видно, что без учета влияния внутренних волн число Прандтля почти не меняется с высотой.

На рис. 2 показано поведение турбулентного числа Прандтля, характеризующего относительную интенсивность переноса импульса и тепла

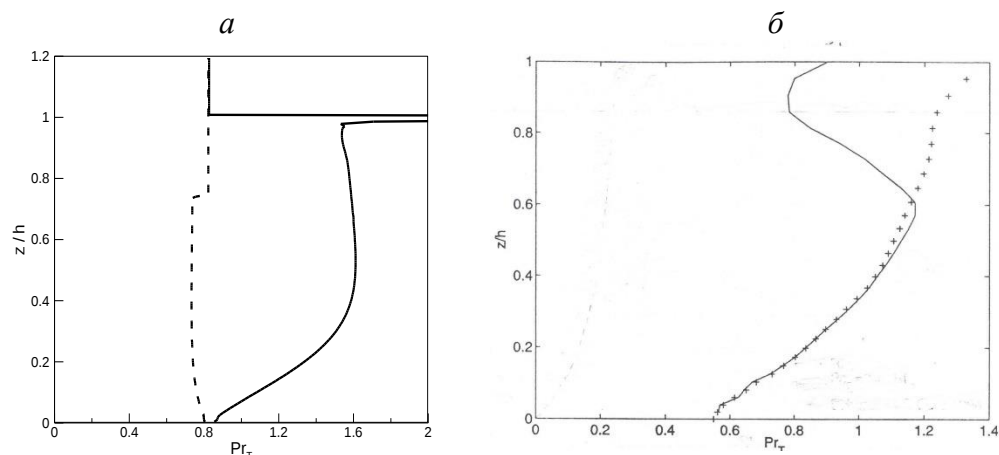


Рис. 2 – Поведение турбулентного числа Прандтля:

a – вертикальный профиль турбулентного числа Прандтля, вычисленный по трехпараметрической RANS-схеме турбулентности, сплошная линия – вычисление с учетом эффекта внутренних гравитационных волн в поддержании импульса течения в устойчиво стратифицированном пограничном слое, штриховая – вычисление без учета эффекта внутренних волн; *б* – вертикальные профили турбулентного числа Прандтля для случая умеренного охлаждения поверхности $(\overline{w'\theta'})_s = -0,02 \text{ K м с}^{-1}$, сплошная линия – LES моделирование, символы в форме крестиков – DNS моделирование

1.3. Параметризация и численное моделирование метеорологических эффектов лесного массива

В настоящее время известны лишь некоторые из многочисленных сложных воздействий высокого лесного покрова на метеорологическую структуру пограничного слоя атмосферы. Например, наблюдения в лесных массивах показывают, что по сравнению с ситуацией в случае низкого растительного покрова наблюдается пониженная скорость ветра и неустойчивый слой в ночное время, в то время как в дневное время температура повышается с высотой. Много полезной информации об этих явлениях может быть получено путем численного моделирования. Ограничением использования численных моделей часто является большое количество необходимого компьютерного времени. Поэтому в настоящем исследовании для описания воздействия высокого лесного массива на структуру атмосферного пограничного слоя

приводятся результаты применения схемы параметризации, предложенной Шиллингом. Эта схема для описания воздействия высокого лесного покрова на структуру атмосферного пограничного слоя используется в расчетах по негидростатической атмосферной модели, основанной на конечных элементах. Основным преимуществом схемы является то, что динамические и термодинамические эффекты лесного покрова могут быть удовлетворительно моделированы с использованием **невысокого** разрешения в численной модели. **Это позволяет экономить ресурсы при учете метеорологических эффектов в лесном массиве.**

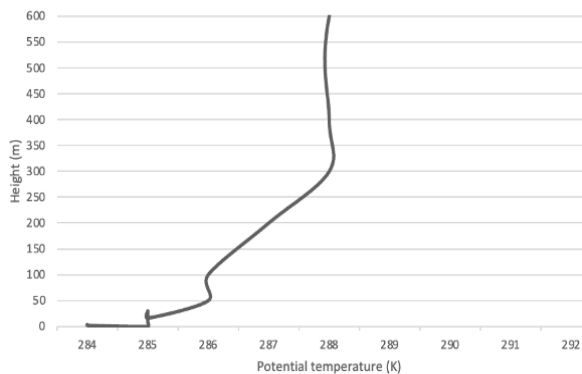


Рис. 3 – Распределение потенциальной температуры (К) с высотой (м)

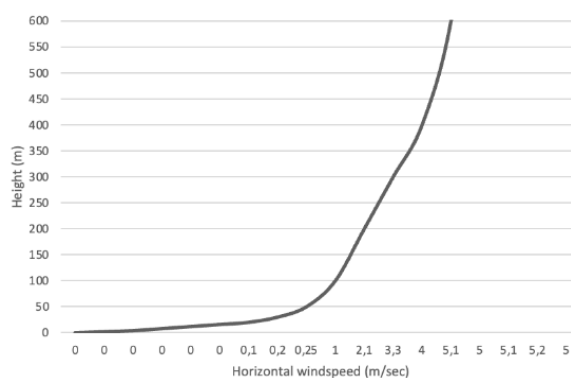


Рис. 4 – Распределение горизонтальной скорости ветра (м/с) **по высоте** (м)

Применимость этого подхода в численных моделях показана с помощью двумерной модели конечных элементов для сжимаемой атмосферы. Результаты моделирования (рис. 3, 4) удовлетворительно воспроизводят известные метеорологические явления в лесных районах, такие как устойчивая стратификация температуры вблизи поверхности в течение дня, нейтральное или слегка неустойчивое состояние в ночное время и уменьшение силы ветра в лесном покрове в целом.

2. Разработка и реализация согласованных численных схем для решения прямых задач и ансамблей сопряженных задач для трехмерной нестационарной модели адвекции-диффузии-реакции.

На данном этапе выполнения проекта в рамках разрабатываемой системы прямого и обратного моделирования реализованы алгоритмические конструкции, реализующие решение прямых и сопряженных задач для трехмерной модели адвекции-диффузии-реакции. При этом численные схемы для прямых и сопряженных задач согласованы в смысле дискретного аналога соотношений чувствительности, связывающих вариацию функции состояния математической модели и соответствующих **вариаций** параметров математической модели адвекции-диффузии-реакции ("источников"). Такая согласованность позволяет избежать неконтролируемых погрешностей при вычислении оператора чувствительности. Реализованы процедуры решения ансамблей сопряженных уравнений, отличающихся "правыми частями". Элементы такого ансамбля имеют одинаковые коэффициенты численных схем, что позволяет сэкономить на их вычислении. Распараллеливание реализовано на основе стандарта OpenMP.

Численные схемы для прямых и сопряженных уравнений строятся в рамках аддитивно усредненного метода расщепления по физическим процессам и пространственным переменным. Для одномерных стадий адвекции-диффузии используются неявные схемы типа направленных разностей. Для стадии трансформации используется дискретно-аналитическая схема первого порядка на основе локально сопряженных задач. Реализованные алгоритмические конструкции

на следующих этапах выполнения проекта будут использованы для вычисления операторов чувствительности для трехмерных моделей адвекции-диффузии-реакции.

3. Построение новых численных методов и алгоритмов для решения задач гидротермодинамики и распространения примесей в оз. Байкал и их эффективная реализация.

Разработаны новые версии реализации крупномасштабных моделей гидротермодинамики и распространения примесей в оз. Байкал. Одной из главных целей было улучшить пространственное разрешение и, следовательно, построить соответствующую реализацию на параллельных компьютерах, а также подготовить базы данных для этого перехода. В результате равномерное разрешение было улучшено по каждому горизонтальному направлению в три раза, по вертикали разбиение осталось неравномерным ($721 \times 269 \times 50$). В рамках вариационного подхода исходным объектом численной реализации моделей является интегральное тождество, в котором участвуют все уравнения с граничными и начальными условиями. На основе этого тождества с использованием идей метода расщепления по физическим процессам и по пространственным переменным строятся конечно-разностные аппроксимации. В математических моделях физики атмосферы, океана и окружающей среды наиболее трудоемкими являются этапы расщепления, когда необходимо решать двумерные задачи для поверхности уровня и трехмерные задачи для полей давления, которые возникают на отдельных этапах расщепления. Для этих целей в новых версиях использованы итерационные методы с неполной факторизацией. Стандарт OpenMP использован для создания параллельных версий.

Новые версии моделей участвуют в качестве базисных при выполнении тематических исследований, связанных с изучением оз. Байкал. При моделировании природных процессов необходимо учитывать большое число параметров, влияющих на эти процессы. Так, гидродинамические процессы, протекающие в озере, находятся под большим влиянием внешних воздействий. Одним из самых значительных из них является ветер. В выполненных "климатических" сценарных расчетах проанализирована пространственно-временная изменчивость системы течений, поля температуры и областей распространения примесей от заданных источников, получающаяся при воздействии системы ветров различных направлений, заданных в краевых условиях на поверхности озера. С помощью модели изучается трехмерная горизонтально-вертикальная динамическая структура полей течений, температуры и концентрации примесей. На **рис. 5** приведены фрагменты сценарных расчетов. В модели воспроизводится неустойчивость Кельвина – Гельмгольца, возникающая при наличии сдвига между слоями сплошной среды – атмосферой и водой (рис. 5,а). Сложная система течений и соответствующее ей поле температуры на поверхности (рис. 5,б) сформировались в модели озера в результате неравномерного прогрева вод над участками с разными глубинами при динамическом воздействии полей ветра и взаимодействии других внешних и внутренних факторов, учитываемых в 4D модели.

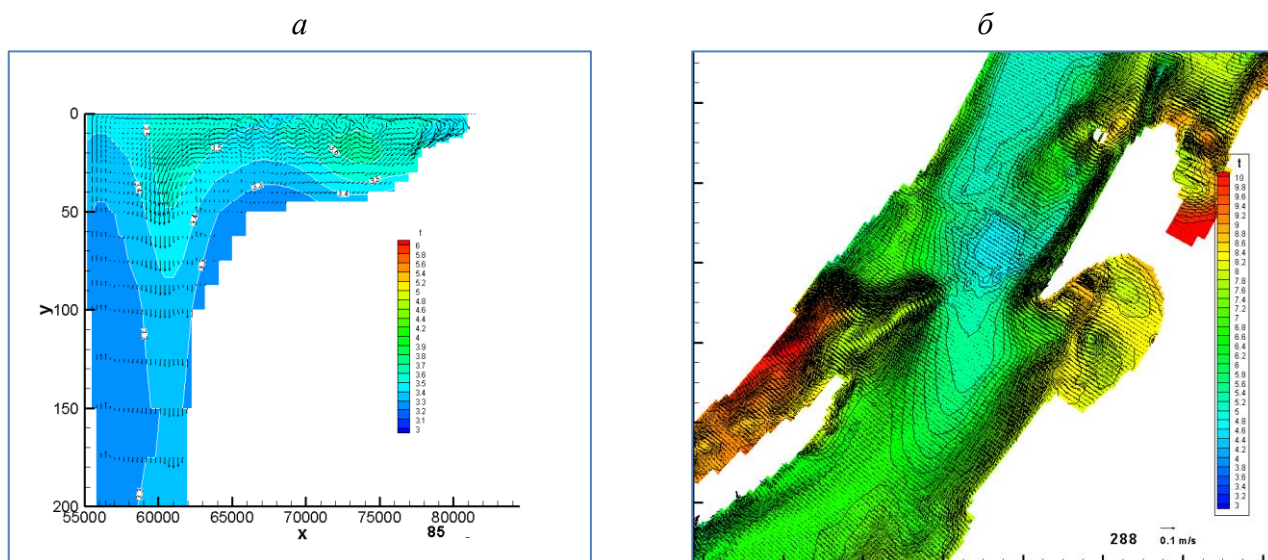


Рис. 5 – Поле течений и температуры: в верхнем 200-м слое в одном из вертикальных сечений области в Баргузинском заливе (а); на поверхности в районе Академического хребта (б)

4. Облачная технология построения векторных полей перемещений природных сред по разновременным спутниковым снимкам с использованием координат опознаваемых объектов.

Технология состоит из трех частей:

1. Выполняемая на компьютере пользователя программа, предназначенная для ввода координат объектов на соседних по времени изображениях.
2. Скрытая в облаке вычислительная компонента, которая, используя файл с введенными координатами объектов, выполняет необходимые действия по построению полей перемещений.
3. Серверная компонента, обеспечивающая взаимодействие пользователя с удаленной вычислительной компонентой.

Опознаваемые объекты. Задача построения полей распространения загрязнений морской среды по разновременным спутниковым данным находится в тесной связи с задачей определения скорости и направления векторов пространственных перемещений водных масс. В качестве исходных данных в задаче используется спутниковая информация видимого, инфракрасного или микроволнового (радиолокационные данные) диапазонов. Используется метод построения полей пространственных перемещений водных масс по опознаваемым изменениям некоторых водных объектов (трассеров) на последовательных спутниковых изображениях, трансформированных в единую картографическую проекцию. В качестве трассеров на изображениях оптического диапазона используются водные объекты, сформировавшиеся в результате цветения вод (линейные и вихревые структуры распределения фитопланктона и водорослей). Для изображений инфракрасного диапазона в качестве трассеров используются в основном линейные и вихревые термические структуры, для радиолокационных изображений – нефтяные пленки и пленки биогенных загрязнений.

Аналогичный подход используется в мониторинге пространственных перемещений ледяных полей. В этом случае в основном используются мозаики, составленные из трансформированных в одну и ту же картографическую основу радиолокационных спутниковых снимков (наиболее часто используются снимки Северного Ледовитого океана из-за их высокой значимости для целей метеорологии и проводки судов).

Процесс ввода координат объектов-трассеров состоит в указании их положения на текущем и следующем по времени изображениях и сохранении введенных координат в файле, который будет передан в облачную среду для завершающей стадии обработки. При этом на спутниковых изображениях предварительно производится "закрепление" контуров береговой черты с помощью опорных точек, таким образом, на картах распределения полей пространственных перемещений природных объектов происходит отделение неподвижной суши от перемещающихся объектов.

Вычислительная компонента. По введенным координатам объектов на текущем изображении строится триангуляция Делоне. Каждому треугольнику триангуляции соответствует треугольник на следующем изображении. Такое множество пар треугольников задает множество кусочно-аффинных преобразований плоскости. Эти преобразования применяются к узлам регулярной сетки на текущем изображении, формируя требуемые векторы перемещений. На рис. 6 приведен фрагмент изображения Северного Ледовитого океана с построенной по координатам объектов триангуляцией Делоне и узлами сетки.

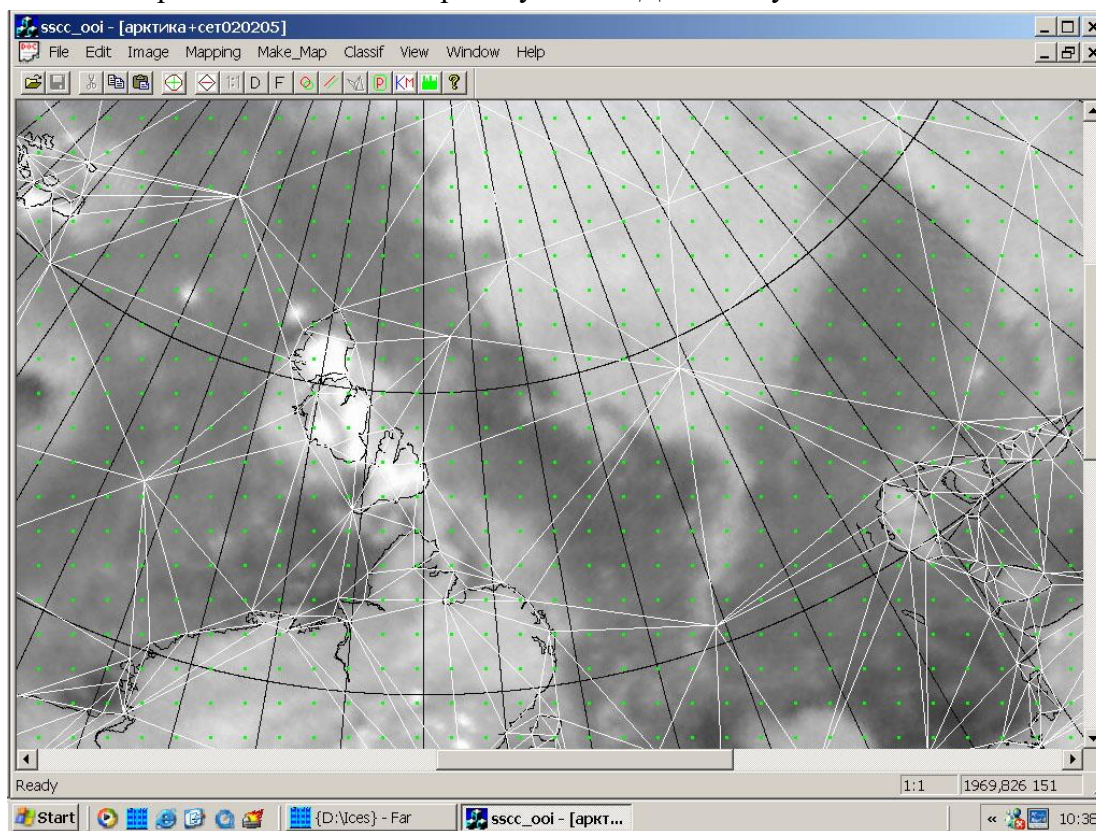


Рис. 6 – Фрагмент триангуляции Делоне с узлами сетки

На **рис. 7** показан процесс переноса водных масс в Азовском море в течение двух суток 8–9 сентября 2006 г.

Одновременно с построением поля векторов пространственных перемещений природных объектов могут быть построены гистограммы скоростей и направлений этих векторов.

Серверная компонента реализована в рамках создаваемого в проекте фреймворка SSCCCloudIP, представляющего собой Web-сервер, разрабатываемый на языке Python с использованием Web-фреймворка Django. В рамках работ отчетного периода реализованы:

1. Макетный файловый HTTP-сервер для загрузки исходных данных и скачивания результатов.

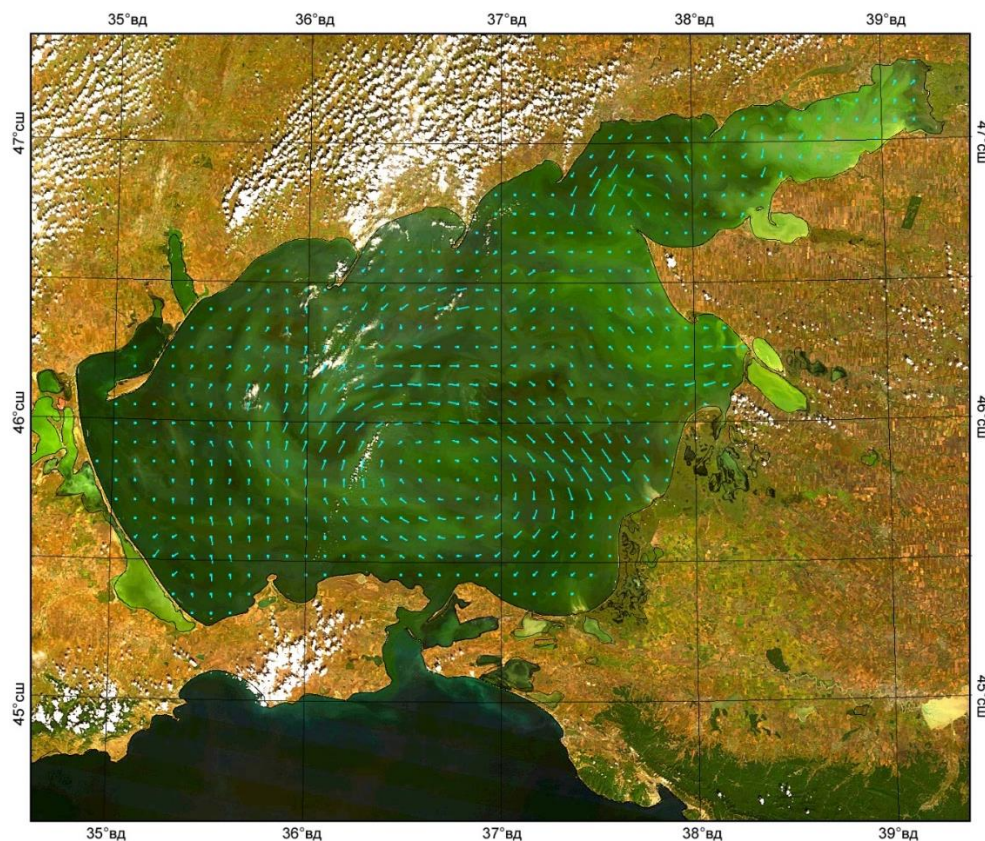


Рис. 7 – Перенос водных масс в Азовском море 8–9 сентября 2006 г.

2. Макетный Web-сервис Drift, позволяющий выполнить на сервере построение поля векторов пространственных перемещений объектов. Сервер обеспечивает взаимодействие согласно спецификации JSON-RPC: клиент посылает серверу запрос HTTP POST, тело которого – JSON-объект со полями, содержащими значения параметров построения поля перемещений. После завершения вычислений (выполнения приложения вычислительной компоненты) сервер в ответе на запрос возвращает описание полученного результата (в случае сервиса Drift – пути к файлам результата).

Для автоматизации процесса выполнения удаленной обработки в проекте создается Python-пакет PySSCCloudIP, реализующий клиентскую часть протокола взаимодействия с сервером: загрузку исходных данных с компьютера пользователя на сервер, удаленное выполнение вычислений и скачивание результатов с сервера на компьютер пользователя.

Технология также может быть использована в Web-приложениях, выполняемых в современных Web-браузерах.

5. Обработка изображений на высокопроизводительных ЭВМ, оснащенных несколькими ускорителями Intel Xeon Phi

Для получения возможности использования ЭВМ, оснащенных несколькими ускорителями Intel Xeon Phi, в развиваемую в проекте библиотеку ParImProLib для обработки изображений на высокопроизводительных ЭВМ введена возможность распараллеливания вычислений одновременно с помощью технологий MPI и OpenMP. Схема реализованного способа обработки: изображение распределяется ("разрезается", возможно с перекрытиями соседних фрагментов) между несколькими MPI-процессами, каждый из которых выполняет обработку отдельного фрагмента одновременно несколькими OpenMP-потоками. Этот способ обработки и созданный программный код очень близки способу и коду для обработки одновременно несколькими Intel Xeon Phi (так как вычисления на данном типе ускорителей также реализуются посредством

OpenMP) и будут использованы для реализации выполнения вычислений непосредственно на микропроцессорах Intel Xeon Phi на следующих этапах проекта.

Разработка библиотеки ParImProLib ведется на гибридном кластере ССКЦ НКС-1П, получаемые результаты позволят расширить состав программного обеспечения суперкомпьютерных центров и облегчить использование трудоемких вычислительных алгоритмов в прикладных дистанционных исследованиях.

6. Синхронная визуализация локальных картографических объектов в "голографическом" режиме

Работа направлена на развитие геометрических методов в многомерных пространствах. Важным индикатором этого формирующегося технологического тренда является патент США, в котором представлено устройство, создающее виртуальный четырехмерный объект. Для решения вопросов визуализации четырехмерных объектов в трехмерном пространстве предлагается выбрать подходящее многообразие, в данном случае шар, устанавливая гомеоморфизм с объектами, находящимися на четырехмерной гиперсфере, с помощью технологических средств картографии.

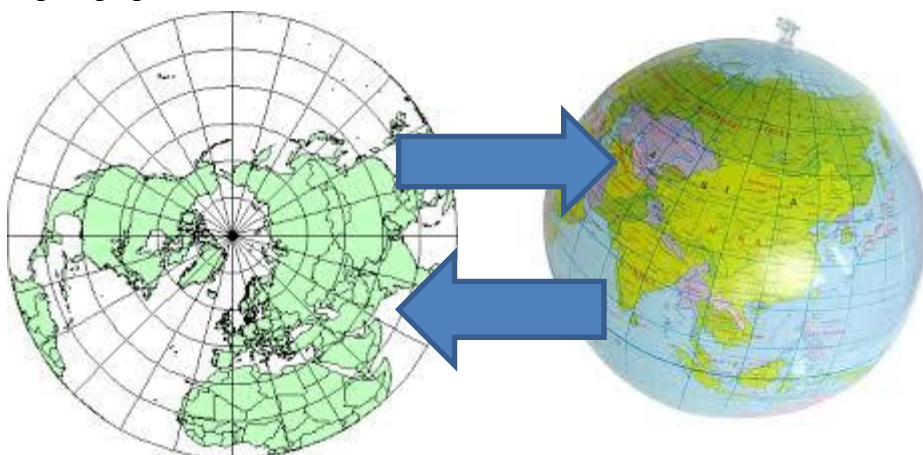


Рис. 8 – Географическая карта и глобус представляют собой информационно одну и ту же систему, визуализированную в разных пространствах

Схема такого соответствия, поясняющая взаимодействие гомеоморфных многообразий, показана на рис. 8 для меньших по размерности двумерных пространств.

Задавая внутри шара соседние картографические поверхности сфер картами изменений географии Земли во времени, мы получим послойные параллели в четырехмерном пространстве, которые могут быть отслежены в виде кинокартины в технологии, отображающей процесс изменения мира (рис. 9), последовательно переходя к следующей по порядку слоев географической карте. При этом на поверхности гиперсферы графическое изображение не будет связано с существующими форматами киноотображения напрямую, и можно считать, что речь идет об ином прочтении или ином способе визуализации четырехмерной информации.



Рис. 9 – Динамическое развитие во времени картографического изображения Земли может быть представлено многослойными схемами его изменений

1.7. Решение задачи обращения Радона в полосе итерационными методами с нелинейными ограничениями для восстановления структуры грязевого вулкана по виброакустическим данным

Для реконструкции структуры грязевого вулкана Карабетова применяются томографические методы. Рассматривается линеаризованная прямая задача с данными в виде интегралов по лучам подобно постановкам классической рентгеновской томографии. Геометрия сбора геофизических данных вибропросвечивания вулкана позволяет моделировать прямую задачу восстановления скоростных профилей приповерхностных объемов в виде преобразования Радона в полосе, на одной стороне которой находятся источники, на другой – приемники. Проведено сравнение результатов применения аналитического обращения преобразования Радона, использующего метод конечных характеристических элементов, и итерационного метода Качмажа для решения возникающих систем линейных алгебраических уравнений. Итерационный алгоритм модифицирован с использованием метода минимизации полной вариации. Для случая схемы просвечивания в виде пары ортогональных полос "источники – приемники" показано теоретически, что система двух интегро-дифференциальных уравнений прямой задачи факторизуется, и реконструкция сводится к двум известным вычислительным процедурам, результаты которых затем суммируются.

Результаты работ по проектам РФФИ

Проект РФФИ 20-01-00560 "Алгоритмы последовательного продолжения с оценкой неопределенностей в задачах обратного моделирования для природоохранной тематики".

Руководитель д.ф.-м.н. Пененко В. В.

В настоящем проекте разрабатывается методология решения задач природоохранного прогнозирования и проектирования, которые формулируются как математические задачи продолжения. Основная идея проекта заключается в том, что функция состояния модели восстанавливается по неполной информации с помощью алгоритмов, идентифицирующих дополнительно введенные в модель функции неопределенности. Задание множества допустимых функций неопределенности позволяет регулировать свойства решений. Таким образом, задача о поиске функции неопределенности является вспомогательной для продолжения функции состояния из наблюдаемой области в ненаблюдаемую по пространству, времени или компонентам функции состояния. Кроме функций неопределенности в нашем подходе существенное значение имеют функции чувствительности и сопряженные уравнения, которые являются основой для решения обратных задач идентификации выбранных функций неопределенности.

В отчетном периоде изучались задачи продолжения для нелинейных моделей с многокомпонентными функциями состояния, элементы которых связаны между собой цепочками трансформаций. В качестве функций неопределенности выступали правые части моделей (источники) и коэффициенты операторов трансформации. Для идентификации функций неопределенности использовались оптимизационные метаэвристические и градиентные алгоритмы, а также алгоритмы на основе ансамблей решений сопряженных уравнений и операторов чувствительности. В частности, изучались задачи усвоения данных, которые рассматривались как последовательности связанных задач продолжения на последовательности подынтервалов по времени – окон усвоения. При этом в каждом окне усвоения имелся свой набор данных и функций неопределенности. Также изучалось соотношение между обратными задачами, когда все данные измерений имеются к началу работы алгоритма, и задачами усвоения данных, когда данные измерений поступают последовательно. Для моделей химии атмосферы было численно изучено, как на точность продолжения по элементам функции состояния влияет размер окна усвоения.

Проект РФФИ 19-47-540011p_a "Сценарный подход для оценки качества воздуха в Новосибирске методами прямого и обратного моделирования".

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

Разрабатывается методика оценки качества воздуха в городах с использованием различных данных мониторинга на примере Новосибирска. Чтобы оценить качество атмосферы с помощью модели распространения и трансформации примесей, необходимо иметь представление об источниках этих примесей. Как правило, информация о них является неполной. Поэтому в проекте на реалистичных сценариях тестируются алгоритмы идентификации источников на основе операторов чувствительности и ансамблей решений сопряженных уравнений.

При построении реалистичных сценариев обратного моделирования учет городской специфики осуществлялся через параметры, отвечающие за перенос примесей в атмосфере над городом и характерные для города схемы расположения распределенных источников. В частности, по реальным данным были построены параметризации и исследованы сценарии движения автотранспорта.

Алгоритмы идентификации источников тестировались в сценариях с данными измерений в виде снимков полей концентраций отдельных химических веществ, временных рядов концентраций на постах мониторинга. Новым в проекте является рассмотрение комбинации этих типов данных. Таким образом, количественно оценен эффект совместного использования различных типов данных. Также численно исследована возможность восстановления "тонкой" структуры распределенного источника в различных метеорологических сценариях. Исследована эффективность распараллеливания алгоритма в реалистичных условиях.

В рамках проекта разработана и протестирована методика моделирования качества воздуха для городских условий на основе операторов чувствительности и с использованием данных измерений распределенного и локализованного типов, а также их комбинации.

Проект РФФИ 19-07-01135 "Разработка алгоритмов на основе ансамблей сопряженных функций для нахождения коэффициентов в моделях продукции – деструкции по данным точечных измерений".

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

В результате выполнения проекта разработаны и исследованы новые версии численных алгоритмов решения обратных коэффициентных задач для моделей продукции – деструкции на основе операторов чувствительности и ансамблей решений сопряженных уравнений для точечных данных измерений функций состояния модели. В рамках **использованного подхода к решению обратной задачи** строится семейство квазилинейных операторных уравнений **различных размерностей**. Полученные операторные уравнения решаются алгоритмами типа Ньютона – Канторовича. Квазилинейная структура уравнений позволяет также анализировать свойства обратной задачи на основе анализа сингулярного разложения оператора чувствительности. В ходе выполнения проекта изучена возможность предсказывать решение обратной задачи на основе различных агрегатов оператора чувствительности. Проведены отладка и тестирование разработанных алгоритмов на моделях продукции – деструкции различной сложности для химических и химико-биологических систем. В частности, построены согласованные в смысле тождества Лагранжа дискретно-аналитические численные схемы для операторов чувствительности в дискретной форме. В проведенных численных экспериментах алгоритм продемонстрировал высокую эффективность в сравнении со стандартными реализациями безградиентных и градиентных алгоритмов, широко применяемых при исследовании химических, биологических, экономических и других процессов, описываемых моделями типа продукции – деструкции.

Прочие гранты

Крупный научный проект "Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории" (Соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2020-787 от 12.10.2020).

Блок 1. Формирование концептуальных основ инструментальной, инфраструктурной и прикладных цифровых платформ экологического мониторинга и прогнозирования.

Направление "Численный анализ области наблюдаемости систем мониторинга качества атмосферы в Байкальском регионе на основе операторов чувствительности обратной задачи идентификации источников".

Для целей проекта используются методы прямого и обратного моделирования. Одна из основных наших идей в этом проекте – предложить методику оценки эффективности гетерогенной системы мониторинга путем оценки точности идентификации расположенных в регионе источников выбросов, по данным, предоставляемым системой мониторинга. В разрабатываемом подходе обратного моделирования задача идентификации источника преобразуется в квазилинейное операторное уравнение с оператором чувствительности, состоящим из функций чувствительности, которые оцениваются на элементах ансамбля решений сопряженных уравнений. Элементы соответствуют заданным агрегатам элементов данных измерений. Такое построение ансамбля позволяет унифицированно работать с разнородными данными измерений в одном операторном уравнении. Квазилинейная структура полученного операторного уравнения позволяет как решать, так и прогнозировать решения обратной задачи поиска источников. В качестве основного агрегата для построения оценок рассматривался проектор оператора чувствительности на ортогональное дополнение к ядру, описывающий часть информации об источнике выбросов, содержащейся в данных измерений. Для сравнения

различных оценок точности идентификации источников использовался набор сценариев обратного моделирования для Байкальского региона. При моделировании использовались данные о гидродинамических процессах за конкретные интервалы времени.

Протестирована эффективность различных оценок информативности данных гетерогенной системы мониторинга, основанных на оценке точности идентификации источников выбросов, расположенных в регионе (рис. 10,а), по тем данным, которые предоставляет система мониторинга (рис. 11).

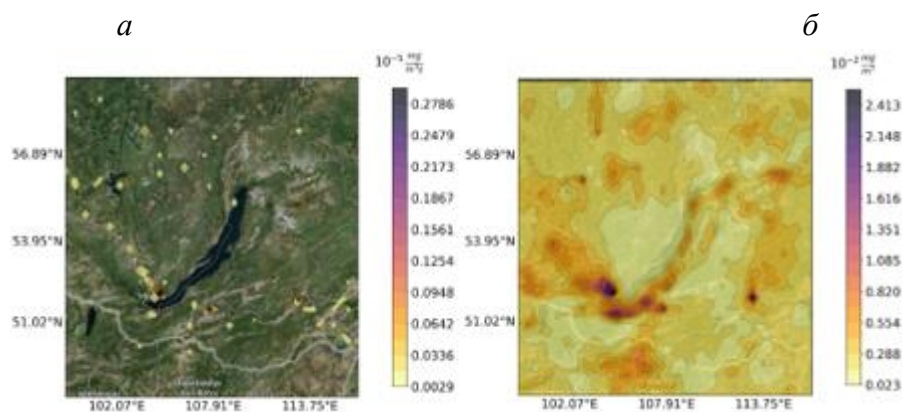


Рис. 10 – Одна из рассмотренных конфигураций источников выбросов (а). Средняя за временной интервал концентрация NO для данной конфигурации источников выбросов (б)

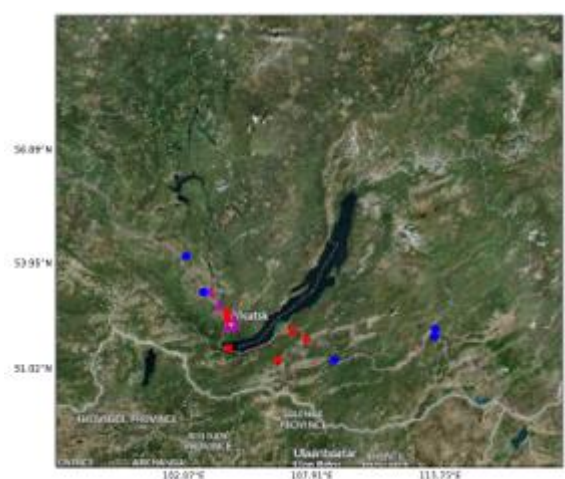


Рис. 11 – Расположение объектов мониторинга ОЗ: красные крестики – временные ряды; синие кружки – точечные измерения в пространстве и времени; пурпурные треугольники – интегралы за интервал времени

Численно проанализированы области наблюдаемости систем мониторинга качества атмосферы, действующих в регионе (рис. 12). Исследование выполнено на основе программы для идентификации источников загрязнений и продолжения полей концентраций загрязняющих примесей по гетерогенным данным мониторинга на основе нестационарной модели переноса и трансформации примесей в атмосфере.

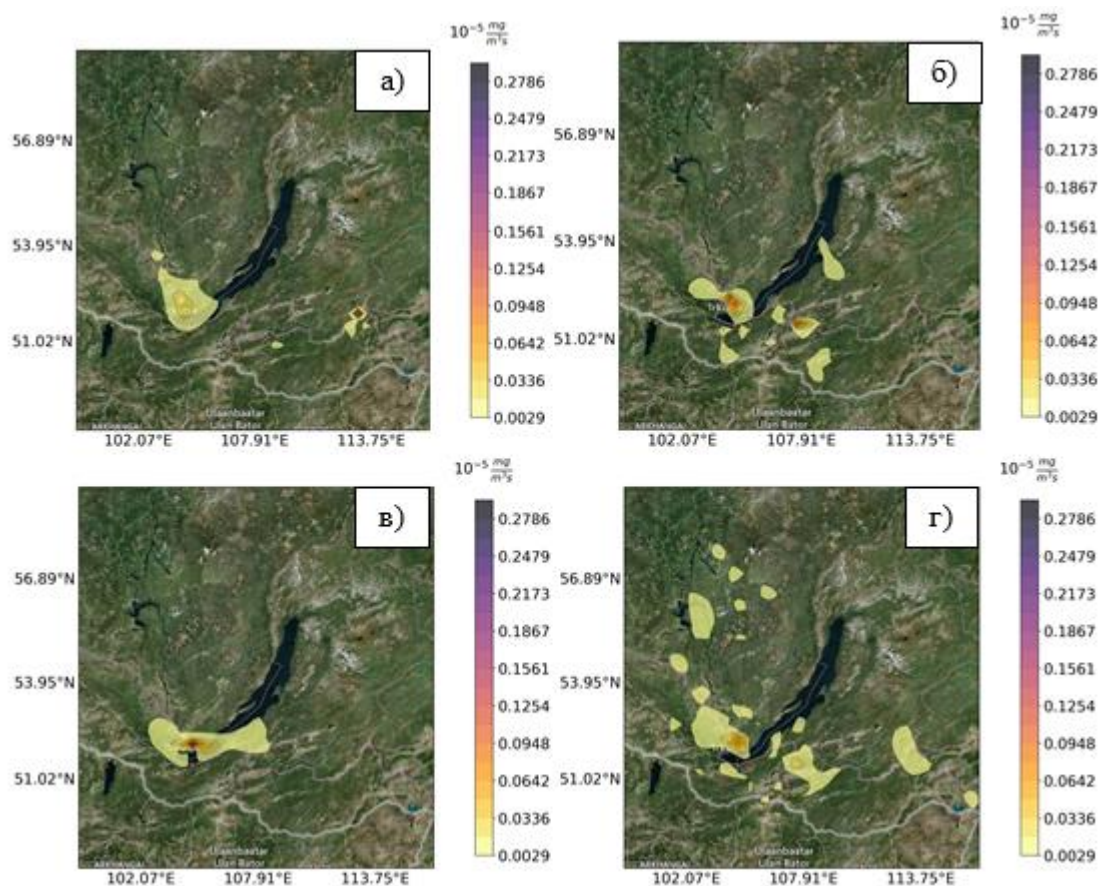


Рис. 12 – Идентификация источника в реалистичной конфигурации для отдельных типов измерений: точечный (а); временные ряды (б); интеграл (в); снимок (г)

Для сравнения точности построенных оценок решения обратной задачи поиска

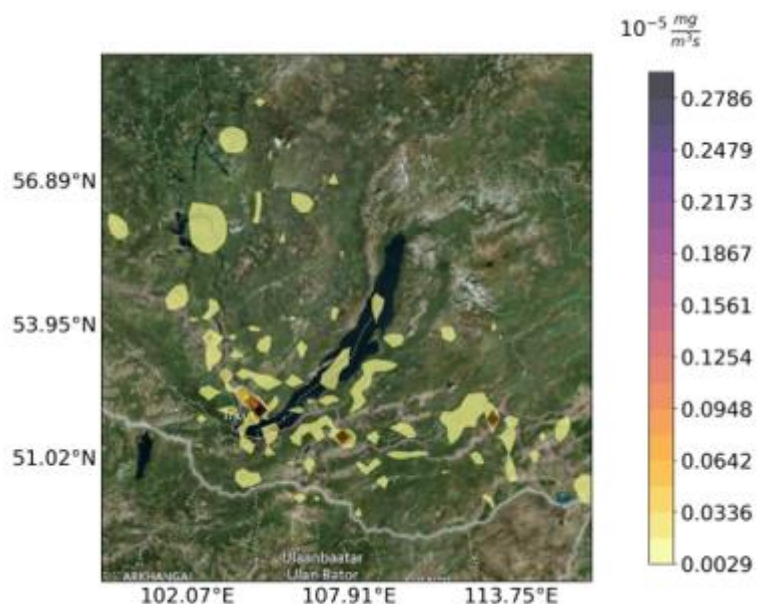


Рис. 13 – Результаты идентификации источника по составным данным

источников были проведены численные эксперименты с разными компоновками систем мониторинга на характерных сценариях обратного моделирования для Байкальского региона. За прототип распределенной системы мониторинга была взята существующая в регионе сеть Росгидромета (контактные наблюдения) и другие типы сетей (спутниковые данные) (рис. 11). Рассматривались оценки для нескольких типов наблюдений: точечных в пространстве и времени, типа временных рядов, интегральных и данных типа изображений (снимков) – а также по отдельности (рис. 12), в разных сочетаниях и совместно (рис. 13).

В рассмотренных сценариях проекция на ортогональное дополнение ядра оператора чувствительности позволила предсказать результаты идентификации источника с наилучшей точностью по сравнению с другими типами оценок (рис. 14). Разные цвета обозначают

разные эксперименты. Близость точек к диагонали характеризует точность оценки

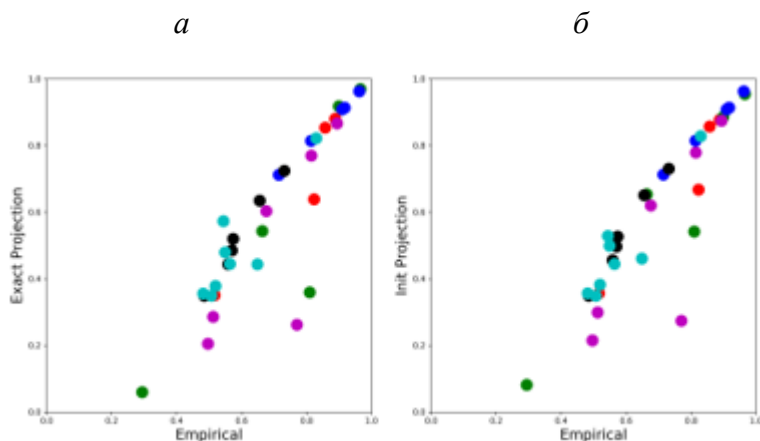


Рис. 14 – Соответствие эмпирической ошибки (решения обратной задачи) характеристикам "Exact Projection" (а) и "Init Projection" (б), полученным на основе проекции на ортогональное дополнение к ядру оператора чувствительности в численных экспериментах

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием известных положений теории сопряженных уравнений. Достоверность полученных численных результатов подтверждается схемой проведения численных экспериментов, когда задается "точное распределение источников", с которым сравниваются результаты решения обратных задач путем применения предлагаемых алгоритмов. Кроме того, выводы проверялись на различных сценариях обратного моделирования для Байкальского региона, задаваемых различными компоновками систем мониторинга.

Основная цель исследований с фундаментальной точки зрения – разработка новых методов прямого и обратного моделирования для эффективного использования данных наблюдений, поставляемых системами мониторинга для решения природоохранных задач, и для оценивания информативности систем мониторинга в регионе с целью их усовершенствования. Наш вклад заключается в разработке и тестировании набора инструментов на основе оператора чувствительности для анализа гетерогенных систем мониторинга качества воздуха. Мы предлагаем их для оценки и оптимизации систем наблюдений и натурных экспериментов.

Публикации

Монографии, главы в монографиях

1. Кирилова, И. А., Подорожная В. Т., Шаркеев Ю. П., Николаев С. В., Пененко А. В., Уваркин П. В., Ратушняк П. В., Чебодаева В. В., Анастасиева Е. А., Голушко С. К., Корель А. В. Свойства деминерализованного костного матрикса для биоинженерии тканей // Физико-химические и механические свойства внеклеточного матрикса как сигналы для управления пролиферацией, дифференцировкой, подвижностью и таксисом клеток : моногр. / под ред. И. А. Кириловой. М.: Физматлит, 2021. Гл. 6. 248 с. ISBN 978-5-9221-1918-42.

2. Пененко А. В., Николаев С. В., Голушко С. К., Ромащенко А. В., Кирилова И. А. Численные алгоритмы идентификации коэффициента диффузии в задачах тканевой инженерии // Физико-химические и механические свойства внеклеточного матрикса как сигналы для управления пролиферацией, дифференцировкой, подвижностью и таксисом клеток : моногр. / под ред. И. А. Кириловой. М.: Физматлит, 2021. Гл. 7. 248 с. ISBN 978-5-9221-1918-4.

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Penenko A., Penenko V., Tsvetova E., Gochakov A., Pyanova E., Konopleva V. Sensitivity Operator Framework for Analyzing Heterogeneous Air Quality Monitoring Systems // Atmosphere. – 2021. – 12(12). – 1697 DOI: 10.3390/atmos12121697
2. Penenko, A. V.; Mukatova, Z. S. & Salimova, A. B. Numerical study of the coefficient identification algorithm based on ensembles of adjoint problem solutions for a production-destruction model // Intern. J. of Nonlinear Sci. and Num. Simul. 2020. Vol. 22. P. 581–592. DOI: 10.1515/ijnsns-2019-0088 (Ahead of print 2020, published 2021).
3. Yudin, M. S., Some meteorological effects of forest canopy in an atmospheric finite-element model // Proc. SPIE 119166T, 27th Intern. symp. on atmospheric and ocean optics, atmospheric physics, Dec. 15, 2021. <https://doi.org/10.1117/12.2603454>.
4. Tsvetova E. A. Mathematical modeling for estimating the distribution of impurities in the Barguzin Bay of Lake Baikal // Proc. SPIE 11916, 27th International symposium on atmospheric and ocean optics, atmospheric physics, 119166K, Dec. 15, 2021. DOI: 10.1117/12.2603424.
5. Penenko, A. V., Konopleva, V. S., Golenko, P. M., Penenko, V. V. Uncertainty-function-based continuation framework in data assimilation algorithms for atmospheric chemistry models // Proc. SPIE 11916, 27th Intern. symp. on atmospheric and ocean optics, atmospheric physics, 119168O. Dec. 16, 2021. DOI: 10.1117/12.2603422.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Kurbatskaya, L. I. Eddy mixing of momentum and heat in stably stratified boundary layers: Numerical study // J. of Phys.: Conf. Ser. 1715. 2021. 012019 IOP Publishing. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/-12019.
2. Kurbatskaya, L. I. Eddy mixing and the intermittent turbulence in atmospheric flows under stronger stratification // AIP Conf. Proc. 2351, 040008 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0052012> Published Online: May 24, 2021.
3. Buchnev, A. A., Getling, A. V., Krovotyntsev, V. A., Pyatkin, V. P. Visualization of the movements of natural objects based on remote sensing data // CEUR Workshop Proc. 2021. Vol. 3006. P. 32–38. DOI: 10.25743/SDM.2021.64.72.006.
4. Penenko, A., Gochakov, A. Parallel speedup analysis of an adjoint ensemble-based source identification algorithm // J. of Phys.: Conf. Ser., IOP Publishing, 2021, 1715, 012072-1-012072-6. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012072.
5. Mikhailov, G. A., Kabanikhin, S. I., Laevsky, Y. M., Penenko, V. V., Glinsky, B. M., Zagorulko, Y. A., Shishlenin, M. A., Podkolodnyy, N. L., Penenko, A. V. // J. of Phys.: Conf. Ser., IOP Publishing, Intern. Conf. "Marchuk Scientific Readings 2021" (MSR-2021), 2021, 2099, 011001. DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/011001. **Добавьте название работы**
6. Mikhailov, G. A., Kabanikhin, S. I., Laevsky, Y. M., Penenko, V. V., Glinsky, B. M., Zagorulko, Y. A., Shishlenin, M. A., Podkolodnyy, N. L., Penenko, A. V. // J. of Phys.: Conf. Ser., IOP Publishing, Intern. Conf. "Marchuk Scientific Readings 2021" (MSR-2021), 2021, 2099, 011001 DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/011001 (не проиндексирована). **Добавьте название работы**
7. Penenko, A., Konopleva, V., Bobrovskikh, A. Numerical comparison of the adjoint problem-based and derivative-free algorithms on the coefficient identification problem for a production-loss model 2021 // 17th International Asian school-seminar "Optimization Problems of Complex Systems (OPCS), IEEE, 2021. DOI: 10.1109/opcs53376.2021.9588680.
8. Казанцев, И. Г., Туребеков, Р. Ж., Султанов, М. А. Моделирование регулярных текстур на изображениях с помощью преобразования Радона // СибЖИМ. 2021. Т. 24, No 2. С. 62–76. DOI: 10.33048/SIBJIM.2021.24.201.
9. Kazantsev I. G., Mukhametzhanova B. O., Iskakov K. T. Detection of the corner structures in 3D arrays using scalable masks // Sib. Electron. Math. Rep. 2021. V. 18, No 1. P. 61–71. DOI: 10.33048/semi.2021.18.006.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Бучнев, А. А., Пяткин, В. П., Русин Е. В. Вычислительные компоненты облачных web-сервисов для обработки данных дистанционного зондирования // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 4, № 1. С. 66–71. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-66-71.
2. Пененко, А. В., Гочаков, А. В. Численный анализ наблюдаемости источников выбросов от дорожной сети города с помощью оператора чувствительности модели переноса и трансформации примеси в атмосфере // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 4, № 1. С. 177–184.
3. Казанцев И. Г. Масштабируемые маски детектора угловых точек на трехмерных изображениях // Интерэкспо Гео-Сибирь. Т. 4. № 1. С. 72–78. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1.

Участие в конференциях и совещаниях

1. 28-я Рабочая группа "Аэрозоли Сибири", Томск, 23–26 ноября 2021 г. – 8 докладов, из них 1 пленарный (Пененко В. В., Пененко А. В., Курбацкая Л. И., Пьянова Э. А., Цветова Е. А., Юдин М. С.).
2. Научная конференция "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология" в рамках 17-го Международного научного конгресса "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 19–21 мая 2021 г. – 8 докладов (Пененко В. В., Пененко А. В., Курбацкая Л. И., Пьянова Э. А., Цветова Е. А., Бучнев А. А., Русин Е. В., Казанцев И. Г.).
3. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г. – 11 докладов, из них 1 пленарный (Курбацкая Л. И., Пьянова Э. А., Пененко В. В., Пененко А. В., Юдин М. С., Цветова Е. А., Коноплева В. С., Голенко П. М.).
4. 27-й Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Москва, 5–9 июля 2021 г. – 6 докладов (Пененко А. В., Пененко В. В., Курбацкая Л. И., Пьянова Э. А., Цветова Е. А., Юдин М. С.).
5. All-Russian Conference with international participation "Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes" (SDM-2021), Novosibirsk, August 24–27, 2021. – 1 доклад (Бучнев А. А.).
6. The 13th International scientific conference and young scientist school "Inverse and Ill-Posed Problems: Theory and Numerics", Novosibirsk, April 12–22, 2021 – 1 пленарный доклад (Пененко А. В.).
7. The 13th International conference on large-scale scientific computations, Sozopol (Bulgaria), June 7–11, 2021 – 1 доклад (Пененко А. В., Пененко В. В., Цветова Е. А., Пьянова Э. А.).
8. Научно-практическая конференция по проблемам гидрометеорологических прогнозов, экологии, климата Сибири, посвящ. 50-летию образования ФГБУ "СибНИГМИ", Новосибирск, октябрь 2021 г. – 2 пленарных доклада (Пененко В. В., Пененко А. В.).
9. Международное мероприятие по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде "CITES-2021" включающее конференцию с элементами школы молодых ученых, Москва, 22–27 ноября 2021 г. – 2 доклада, из них 1 приглашенный (Пененко В. В., Пененко А. В.).
10. 3-я конференция "Проекты, поддержанные Правительством НСО и РФФИ, для экономики региона", Новосибирск, 23 декабря 2021 г. – 1 доклад (Пененко А. В.).
11. EGU General Assembly, April 19–30, 2021, EGU21-7510 – 1 доклад (Пененко А. В., Пененко В. В., Цветова Е. А., Пьянова Э. А.).

Участие в оргкомитетах конференций

1. Пененко В. В.:
– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), посвященной 96-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.,

– член программного комитета Международной конференции и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды "CITES-2021", Москва, 22–27 ноября 2021 г.,

– член программного комитета 27-го Международного симпозиума "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Москва, 5–9 июля 2021 г.,

– член программного комитета 28-й конференции "Аэрозоли Сибири", Томск, 23–26 ноября 2021 г.,

– член программного комитета 13-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 12–22 апреля 2021 г.;

2. Пененко А. В.:

– зам. председателя программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), посвящ. 96-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.,

– член программного комитета 13-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 12–22 апреля 2021 г.;

3. Пьянова Э. А. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2021), посвящ. 96-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.;

4. Юдин М. С. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), посвящ. 96-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 5

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 14

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 3 (общее количество публикаций, включенных в РИНЦ)

Докладов на конференциях – 40, в том числе пленарных 6

Участников оргкомитетов конференций – 9

Кадровый состав

1. Пененко В. В.	зав. лаб.	д.ф.-м.н.
2. Бучнев А. А.	с.н.с.	к.т.н
3. Казанцев И.Г	в.н.с.	д.ф.-м.н.
4. Курбацкая Л. И.	с.н.с.	
5. Пененко А. В.	с.н.с.	д.ф.-м.н.
6. Пьянова Э. А.	н.с.	к.ф.-м.н.
7. Русин Е. В.	с.н.с.	к.т.н.
8. Цветова Е. А.	внс.	к.ф.-м.н.
9. Юдин М. С.	с.н.с.	
10. Карагодина Т. И.	инженер	
11. Коноплева В. С.	инженер	
12. Голенко П. С.	техник	
13. Иванова Г. И.	техник	

Педагогическая деятельность

Пененко В. В. – профессор НГУ

Пененко А. В. – ст. преподаватель НГУ

Руководство студентами

Скорик (Коноплева) В. С. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Пененко А. В.

Защита диссертации

Пененко Алексей Владимирович. "Математическое моделирование процессов адвекции-диффузии-реакции с усвоением данных наблюдений и решением обратных задач": д.ф.-м.н. 05.13.18. Новосибирск, 31.08.2021.

Защита дипломов

Голенко П. М. – магистр ММФ НГУ, руководитель Пененко А. В.