

Лаборатория математического моделирования гидродинамических процессов в природной среде

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

Важнейшие достижения

Разработана новая версия комплекса моделей, алгоритмов и программ, предназначенная для моделирования распространения микропластика (МП) в оз. Байкал

К.ф.-м.н. Цветова Е. А.

Пластисфера – новый термин, недавно появившийся в научной среде. Он отражает факт изменения экосистемы планеты под влиянием поступающего в нее пластика. В связи с большой степенью неопределенности, присущей всем составляющим процесса моделирования природных объектов, начиная от формулировок проблем и постановок задач и заканчивая интерпретацией результатов моделирования, естественно использовать сценарный подход, который позволяет получить вариантную оценку результатов в зависимости от задаваемых параметров. В отчетный период были выполнены исследования по моделированию распространения МП на сценарных расчетах с различными вариантами задания источников загрязнений, связанных с распространением МП, а также параметров, участвующих в моделях. Моделирование выполняется на основе трехмерной негидростатической модели гидродинамики озера и модели распространения примесей.

Результаты исследований опубликованы в работе

Tsvetova, E. Transport model: microplastic in Lake Baikal // Proc. SPIE. V. 12341. 28th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 1234165 (2022)
<https://doi.org/10.1117/12.2644796>.

Результаты исследований представлены на конференциях:

1. Цветова Е. А. Транспортная модель: микропластик в озере Байкал // 28-й Симпозиум "Оптика атмосферы и океана", Томск, 4–8 июля 2022 г.
2. Цветова Е. А. Численное моделирование распространения микропластика в озере Байкал // Международная конференция "Марчужковские научные чтения – 2022" (МНЧ-2022), Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.
3. Цветова Е. А. Пластисфера Байкала: сценарии математического моделирования // 29-я рабочая группа "Аэрозоли Сибири", Томск, 22–25 ноября 2022 г.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершнным в 2022 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.

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

Этап 2022 г.

В настоящем проекте рассматриваются проблемы сложности, чувствительности и неопределенности в интегрированных моделях и структурах систем моделирования в области математического моделирования природных процессов. Один из главных вопросов природоохранного прогнозирования – наличие большого спектра неопределенностей, в том числе

и в экологических моделях, что **существенно осложняет решение вопросов** "достаточной сложности" и интегрированности моделей, используемых для экологических прогнозов. Понятно, что для решения задач охраны окружающей среды нецелесообразно использовать весь комплекс моделей, описывающих взаимодействие атмосферы, океана, суши, ближнего космоса и т. д., включенных в модель системы Земли. Значит, нужно ограничивать сложность моделей соответствующих масштабов, предусматривая при этом возможность учета влияния того, что было отброшено.

Основные типы неопределенностей в моделях качества атмосферы – это неполное знание источников воздействий, конкретных параметров в уравнениях модели, параметризациях подсеточных масштабов, цепочках трансформаций и т. д. Наилучшим выходом видится использование данных наблюдений, возможно, в режиме не только прямых, но и обратных связей. Задачи поиска источников и идентификация параметров – самые распространенные постановки таких задач. Причем обратные задачи усвоения данных формулируются как взаимосвязанные обратные задачи на заданных интервалах (окнах усвоения). В условиях дефицита данных измерений целесообразно использовать методы решения обратных задач продолжения, учитывая, что математические модели в режиме усвоения данных выступают в роли инструментов интерполяции или экстраполяции данных расчетов или данных наблюдений.

Интегрированность в моделях качества атмосферы для задач охраны окружающей среды осуществляется с помощью нескольких составляющих: моделей процессов, моделей и данных наблюдений, а также и управляющих соотношений, которые должны объединить цели и результаты исследований. Методы теории чувствительности работают через оценки вариаций обобщенных функционалов, формулирующих цели исследований, к возмущениям параметров системы для всего комплекса моделей, отдельных фрагментов моделей, целевых функционалов качества прогнозирования природной среды и т. д.

Обращение к упомянутым выше проблемам природоохранного прогнозирования и проектирования обуславливает актуальность решаемых в отчетном периоде конкретных задач.

1. Для трехмерной модели адвекции-диффузии-реакции примесей в атмосфере разработаны и протестированы алгоритмы идентификации источников на основе ансамблей решений сопряженных уравнений и операторов чувствительности.

В результате выполнения задач данного этапа реализованы алгоритмы идентификации источников примесей (правых частей уравнений) для трехмерных моделей адвекции-диффузии-реакции по данным измерения концентраций. При моделировании качества воздуха задача идентификации источников выбросов по данным измерений является ключевой обратной задачей. Трехмерные модели позволяют реалистично моделировать процессы переноса и трансформации примеси в атмосфере, но вместе с тем требуют, во-первых, задания большого количества априорной информации для адекватного описания происходящих в атмосфере процессов и, во-вторых, существенных вычислительных ресурсов и памяти, особенно в режиме решения обратных задач.

Для идентификации источников в работе реализован алгоритм на основе операторов чувствительности и ансамблей решений сопряженных уравнений в трехмерном случае. Оператор чувствительности позволяет связать вариацию искомым величин с вариацией наблюдаемых переменных модели. Для вычисления операторов чувствительности обратной задачи используются наборы согласованных в смысле тождества Лагранжа численных схем, разработанные и реализованные на предыдущем этапе выполнения проекта. Ансамблевый характер алгоритмов обеспечивает их эффективное распараллеливание и допускает выполнение на высокопроизводительных кластерных системах. Новым элементом является реализация алгоритма на основе операторов чувствительности для трехмерных моделей адвекции-диффузии-реакции.

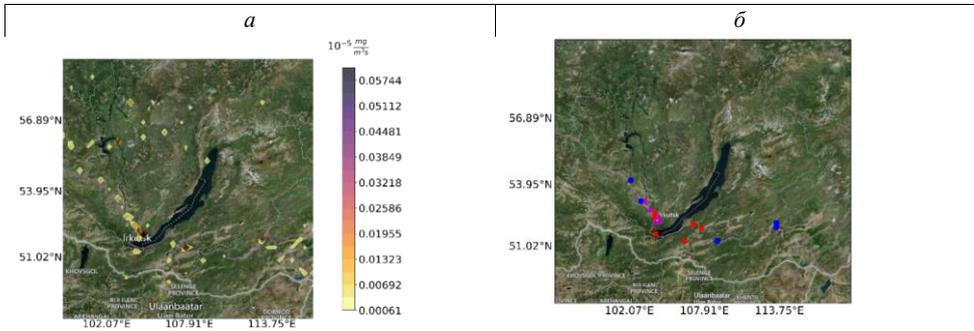


Рис. 1: Схема объектов в постановке модельной обратной задачи идентификации источников. Точное распределение источников NO (а) и расположение постов мониторинга (б). По значениям концентраций O_3 в точках проведения мониторинга требуется оценить неизвестный стационарный источник

Разработанный алгоритм протестирован на различных сценариях обратного моделирования. На рис. 1 представлена постановка задачи определения стационарного источника примесей по косвенным данным измерений, когда измеряемыми являются концентрации вещества, связанного системой химических трансформаций с веществом, выбрасываемым источниками примесей. Размерность задачи: 5 (веществ) \times 60 (точек по x) \times 57 (точек по y) \times 10 (слоев по z) \times 5201 (точек по времени). Количество искомым – 34200. Изменения заданы на "поверхности" в точках мониторинга, и в конце временного интервала также делается "снимок" поля концентрации во всей области. Данные измерений при восстановлении агрегированы в 97 значений.

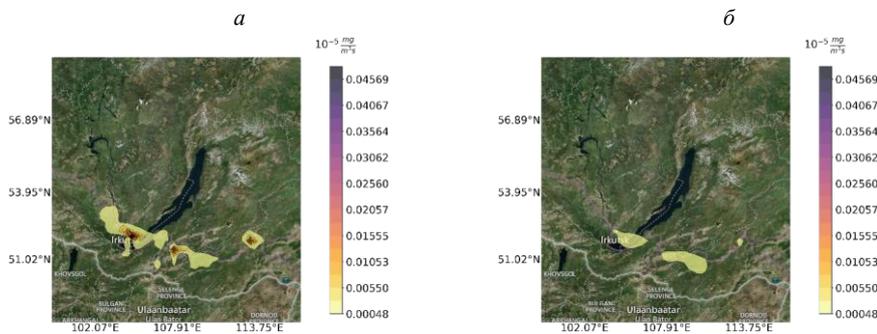


Рис. 2: Результат восстановления трехмерного источника на разных высотах: а – "поверхность" (1-й уровень); б – 580 м (2-й уровень)

а

б

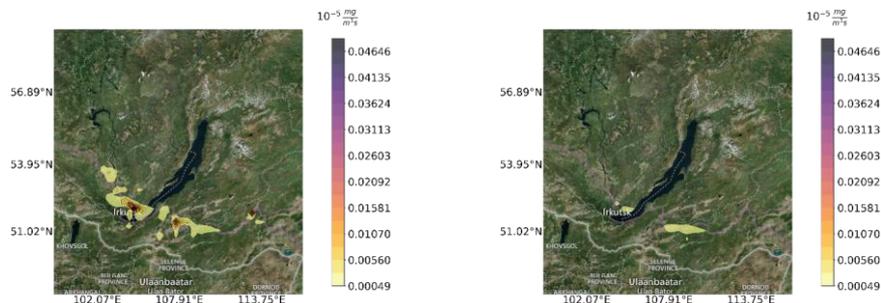


Рис. 3: Проекция точного решения на ортогональное дополнение к ядру оператора чувствительности на разных высотах:

a – "поверхность" (1-й уровень по вертикали); *b* – 580 м (2-й уровень)

На рис. 2 представлены результаты восстановления распределенного наземного источника без ограничения на уровень его расположения по вертикали. Анализируя рис. 2, можно отметить, что, несмотря на отсутствие информации о расположении источника исключительно на поверхности, его "след" уже на втором уровне модели по вертикали существенно слабее "следа" на "поверхности", т. е. на первом уровне модели. Аналогичную картину можно наблюдать и на рис. 3, на котором представлена проекция точного решения на ортогональное дополнение к ядру оператора чувствительности на разных высотах. Эта характеристика, согласно нашим предыдущим исследованиям, позволяет, не решая обратной задачи, оценить, что можно **определить** по имеющимся данным наблюдений.

Таким образом, можно заключить, что реализованный алгоритм расширяет область применимости алгоритмов на основе операторов чувствительности на трехмерные обратные задачи для моделей адвекции-диффузии-реакции, возникающие в различных областях, и, в частности, при оценке и прогнозировании качества атмосферы.

2. Усовершенствованы блоки тепло-массо-переноса в пограничных слоях атмосферы для уточнения процессов взаимодействия атмосферы с неоднородной поверхностью Земли в базовых гидродинамических моделях, разрабатываемых в проекте. С этой целью выполнен ряд исследований, представленных ниже.

Эффекты бифуркации при конечно-элементном моделировании атмосферных полей в лесном массиве. Цель исследования – изучение бифуркационных эффектов, возникающих за счет преобладания нелинейных членов в уравнениях динамики пограничного слоя атмосферы и нахождение экономичных способов включения эффектов растительного покрова в численную мезомасштабную модель, предназначенную для расчета областей с крутой орографией.

Упрощенные модели пограничного слоя атмосферы применяются в широком диапазоне возможных приложений, например для определения начальных профилей метеорологических переменных в сложных трехмерных моделях. При введении параметризации распределения атмосферных полей с высотой в лесном массиве в уравнениях возникают преобладающие нелинейные члены. Обычные критерии устойчивости **численного решения систем** линейных уравнений являются слишком **неточными** при наличии сильной нелинейности. В работе изучалось поведение решения при стремлении к стационарному состоянию. При определенной **величине шага** по времени возникает бифуркационный каскад, который можно устранить, существенно уменьшив шаг. Соответствующее нелинейное разностное уравнение исследовалось методами

теории бифуркаций. Получен улучшенный критерий устойчивости, который переходит в обычный критерий при стремлении нелинейности к нулю. Полученный критерий устойчивости был применен при расчете распределения атмосферных полей в лесном массиве для различных типов растительности.

Схема параметризации, предложенная Шиллингом, была применена в рамках атмосферной модели, основанной на конечных элементах. Основным преимуществом схемы является то, что динамические и термодинамические эффекты лесного покрова могут быть удовлетворительно моделированы с использованием грубого разрешения в численной модели. Применимость этого подхода в численных моделях показана с помощью двумерной модели конечных элементов для холма, равномерно покрытого однородным лесным массивом, состоящим из хвойных деревьев высотой порядка 20 м.

Рассмотрены линейный и нелинейный критерии устойчивости при стремлении метеорологических полей к стационарному состоянию. Для явных численных схем линейный критерий устойчивости непригоден, если нелинейные члены уравнений преобладают. Нелинейный критерий в этом случае дает точную оценку малости шага по времени для получения истинного решения в стационарном состоянии.

Численное исследование переноса примеси в пограничном слое атмосферы на основе трехпараметрического RANS-приближения. Для описания рассеяния пассивной примеси от непрерывного поверхностного источника в пограничном слое атмосферы (ПСА) сформулирована эйлерова дисперсионная модель турбулентной диффузии пассивного скаляра в устойчиво стратифицированной атмосфере. Для этого базовая трехпараметрическая модель турбулентности $E-\epsilon-\langle\theta^2\rangle$ (T-RANS), с помощью которой исследуются структурные особенности проникающей конвекции над островом тепла в устойчиво стратифицированной атмосфере при слабом окружающем ветре и подавляющей инверсии, дополнена уравнениями для осредненной концентрации $C(x,t)$, вектора турбулентного потока примеси $f_i \equiv \langle u_i c \rangle$ и корреляции между флуктуациями концентрации и температуры $\langle c\theta \rangle$. Трехпараметрическая модель турбулентности с дополнительными уравнениями образует замкнутую систему для вычисления характеристик полей ветра, температуры и пассивной примеси. Турбулентные потоки импульса, тепла и примеси определяются полностью явными анизотропными алгебраическими выражениями. Основная цель численного моделирования заключалась в учете влияния плавучести на распределение концентрации примеси в перемешанном и инверсионных слоях над островом тепла.

На рис. 4 показаны два сценария моделирования турбулентной циркуляции и рассеяния примеси над протяженным поверхностным источником тепла и примеси. Первый сценарий приведен для иллюстрации. Он относится к моделированию циркуляции и рассеяния пассивной примеси для лабораторного эксперимента, в котором локализованный источник тепла задается в виде диска, моделирующего прототип города. Во втором сценарии моделируется развитие пограничного слоя атмосферы в течение суток. Горизонтальная протяженность области моделирования равна 120 км с разрешением 1 км. Вертикальное разрешение равно 10 м в пределах первых 50 метров от подстилающей поверхности с последующим растяжением сетки до высоты 1000 м (выше, до 3000 м, шаг постоянен). В центре вычислительной области с абсциссой от 45 до 55 км расположена "урбанизированная" область. В обоих сценариях вертикальный турбулентный тепловой факел от локализованного источника и связанная с ним циркуляция, развиваются вследствие различия температуры между островом тепла и окружающей средой. Турбулентное движение в центре острова тепла доминирует за счет флуктуирующей силы плавучести. В том и другом сценарии задается непрерывный поверхностный источник. В первом случае область

Добавлено примечание ((u1)): Добавьте инициалы

источника примеси расположена вблизи поверхности нагреваемого диска D , во втором случае источник примеси расположен вблизи поверхности урбанизированной области.

О степени достоверности результатов можно судить по косвенным признакам. Во-первых, по сути аналогичная модель переноса активной примеси (тепла) дает результаты, вполне удовлетворительно согласующиеся с данными прямых инструментальных измерений в лаборатории. Во-вторых, точность численного решения для первого сценария проверена на последовательно измельченных сетках (25×116 узлов по горизонтали и вертикали соответственно и сетке 50×232 узла).

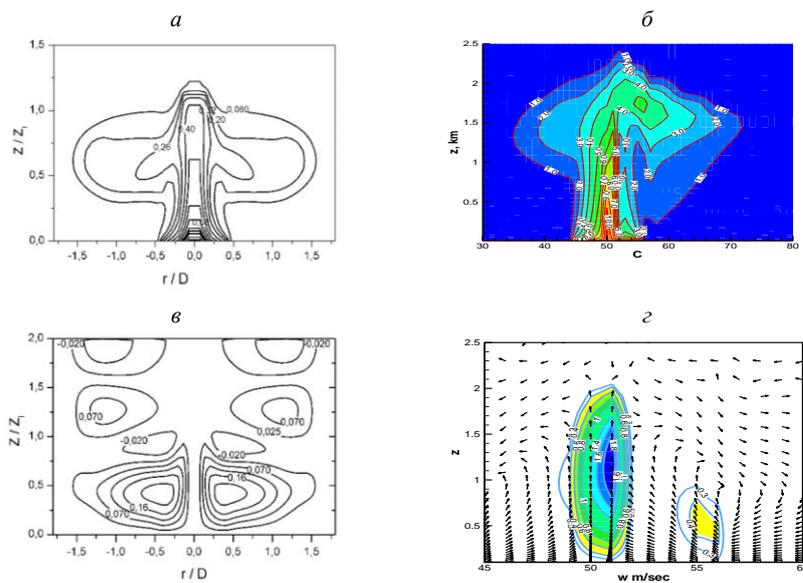


Рис. 4: Рассчитанное распределение примеси для лабораторного эксперимента (D – диаметр источника тепла и примеси, r – текущая координата) (а); вычисленная концентрация пассивной примеси C в ПСА (б); линии тока над островом тепла (в); векторное поле скорости среднего ветра и изолинии средней вертикальной скорости на 12 час. (г)

На рис. 4 слева изображены контуры концентрации примеси для источника, протяженность которого совпадает с протяженностью источника тепла (диаметром нагреваемого диска D), и контуры функции тока, показывающие формирование в пределах перемешанного слоя ($0 \leq z/z_i \leq 1$) двух интенсивных вихрей, создающих мощное восходящее движение в центральной части острова тепла. Видно, что под влиянием интенсивного восходящего движения примесь, не накапливаясь вблизи поверхности, переносится в перемешанный слой и далее в слой инверсии, рассеивается в горизонтальном направлении, а также проникает за пределы инверсионного слоя ($z/z_i \approx 1$). Для ПСА (второй сценарий) наблюдается похожая картина в том смысле, что примесь, не накапливаясь вблизи поверхности, переносится вверх и боковыми движениями рассеивается по всей области (правая часть рис. 4). Как и в первом сценарии, примесь проникает за пределы инверсионного слоя.

Таким образом, моделирование распространения пассивной примеси от непрерывного поверхностного источника над островом тепла с помощью разработанной трехпараметрической теории турбулентного переноса импульса, тепла и вещества позволило получить результаты, качественно согласующиеся с данными лабораторных измерений распространения пассивной

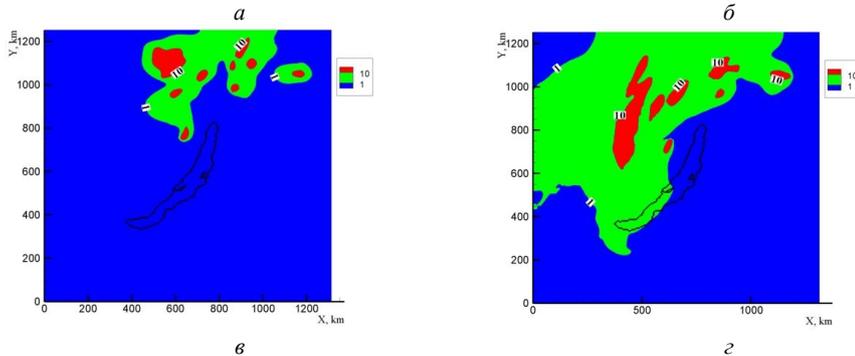
примеси в конвективном пограничном слое. В частности, модель воспроизводит проникновение примеси из слоя перемешивания в инверсионный слой.

В рамках базового проекта продолжалась работа по отладке и исследованию свойств мезомасштабной модели гидротермодинамики атмосферы.

Основными уравнениями модели являются три уравнения движения, уравнения переноса тепла и влаги, уравнение неразрывности. Система уравнений записывается для отклонений метеорологических величин от их фоновых значений, которые считаются известными и заданными. Для моделирования переноса примеси используется адвективно-диффузионное уравнение. Система уравнений замыкается начальными и краевыми условиями. На открытых боковых границах области задавались однородные условия Неймана, на верхней границе – условия выхода полей метеоэлементов на их крупномасштабные фоновые значения. Взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью в модели описывается через параметризацию приземного слоя атмосферы. Применение теории приземного слоя приводит к условиям третьего рода на нижней расчетной границе. В модели учитывается поток солнечной радиации на подстилающую поверхность с учетом ориентации склонов, и для каждого момента времени рассчитывается температура подстилающей поверхности. Данные о крупномасштабных составляющих метеополей берутся из расчетов прогнозной модели COSMO конфигурации COSMO-RuSib.

Одной из целей работы в отчетный период был сценарный расчет на период 12 суток начиная с 24.07.2019 по моделированию распространения дыма от пожаров над территорией, ограниченной 48° и 60° с. ш. и 96° и 120° в. д., в центре которой расположено оз. Байкал. Начальное поле примеси задавалось нулевым. Десять постоянных источников пассивной примеси, имитирующих выбросы дыма от пожаров, задавались в основном в северной части территории в местах скопления реальных очагов возгорания.

По схеме расчетов на каждом шаге по времени решается система уравнений гидротермодинамики атмосферы. Найденные значения компонент скорости ветра являются входными параметрами для решения уравнения переноса примесей на том же шаге по времени. Каждые три часа в модели динамики атмосферы обновляется информация о фоновых полях метеоэлементов. Таким образом, с помощью мезомасштабной модели динамики атмосферы воссоздается поле ветра в Байкальском регионе, далее по модели распространения примесей осуществляется **рассчитывается** перенос примесей от распределенных источников.



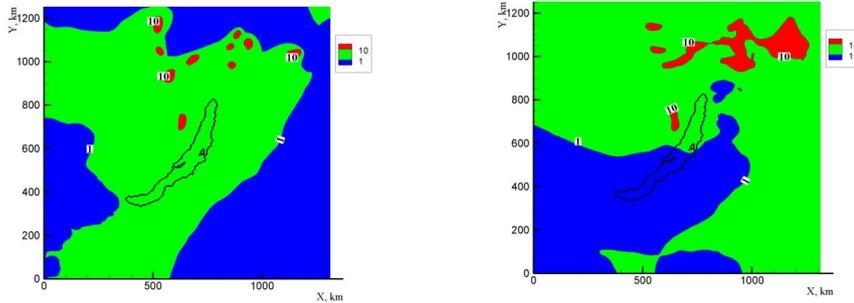
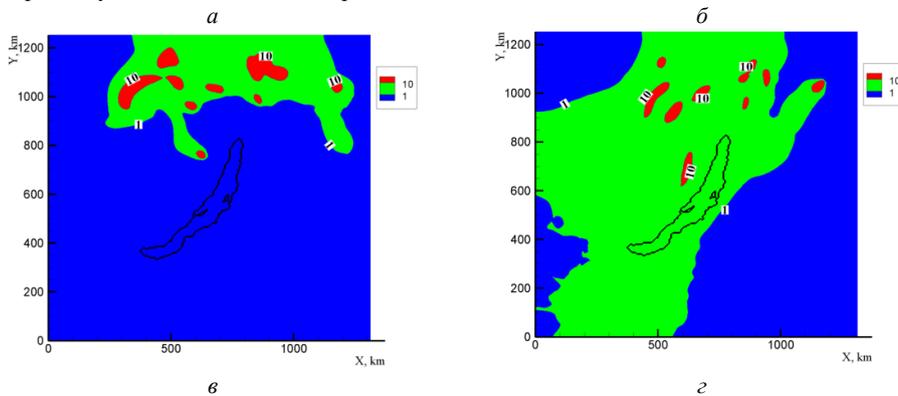


Рис. 5: Расчетные интегральные поля концентрации пассивной примеси (усл. ед.) от 10 источников для различных дат. Суммирование проведено по всем вертикальным уровням области интегрирования (от 100 м над поверхностью и примерно до 7 км над уровнем моря):
a – 05:00 25.07.2019; *б* – 05:00 29.07.2019, *в* – 31.07.2019; *г* – 02.08.2019

В конце июля – начале августа 2019 г. в Байкальском регионе наблюдалось большое количество пожаров севернее оз. Байкал. До 26 июля дымовые шлейфы наблюдались только на севере рассматриваемой территории. Затем произошло смещение дымовых шлейфов к югу. Дымом затянуло практически всю моделируемую территорию. К началу августа произошел разворот и смещение воздушных масс, после чего дым сносился на восток и северо-восток.

В нашем сценарии получились похожие картины развития ситуации. Рассчитанные поля концентраций пассивной примеси представлены на рис. 6. В первые дни расчета примесь локализуется на севере области (рис. 5*а*), затем происходит смещение дыма к югу (рис. 5*б*) и задымление почти всей территории (рис. 5*в*). В первых днях августа идет смещение дыма к северо-востоку, и территория начинает очищаться (рис. 5*г*). На рис. 6 представлены расчетные дымовые шлейфы и спутниковые снимки пожаров, сделанные 26 и 30 июля.



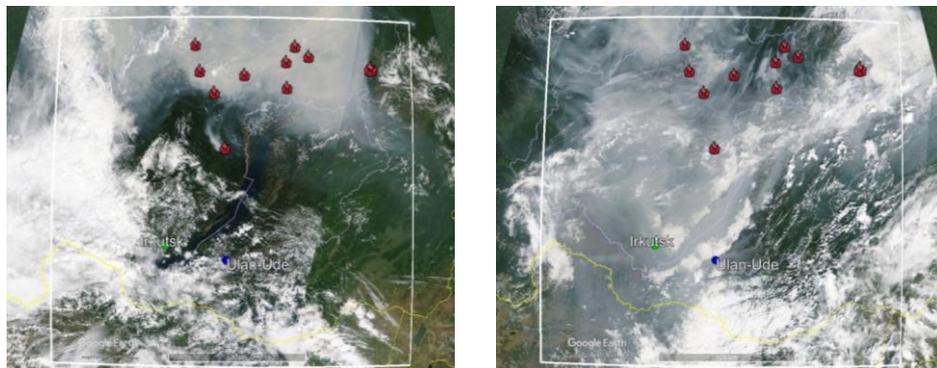


Рис.6: Распространение дыма над Байкальской территорией: поля примеси, рассчитанные на 05:00 26 июля (а), 05:00 30 июля (б); космические снимки 26 июля (в), 30 июля (г)

Кроме моделирования переноса трассеров, имитирующих поведение дымовых шлейфов от пожаров, в сценариях рассматривался перенос пассивных примесей от точечных антропогенных приподнятых источников. Источники были заданы на местах расположения труб котельных и ТЭЦ. Для численного эксперимента взяты объекты, расположенные в Иркутске, Ангарске, Шелехове, Усолье-Сибирском, Байкальске, Гусиноозерске, Улан-Удэ, Каменске, Слюдянке, Бабушкине (рис. 7).

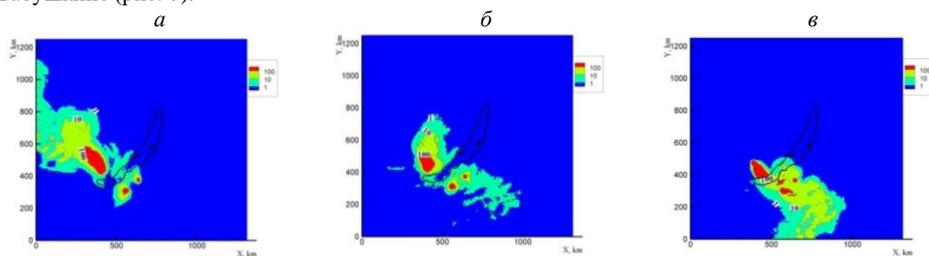


Рис. 7. Интегральная функция распределения пассивной примеси от 10 источников на высоте 100 м над поверхностью на 05:00 местного времени 25.07.2019 (а), 28.07.2019 (б), 01.08.2019 (в)

Моделирование динамики атмосферы региона и процессов рассеивания невесомых пассивных примесей показало, что загрязнения от источников Иркутско-Черемховского промышленного комплекса могут достигать акватории Байкала. В условиях рассмотренного сценария источники на восточном побережье Байкала также оказывают загрязняющее воздействие на атмосферу над озером. В сочетании со смогом от лесных пожаров это приводит к значительной нагрузке на атмосферу региона.

3. Построены новые численные алгоритмы решения задач гидротермодинамики и распространения примесей в локальных зонах оз. Байкал, выполнена их эффективная реализация.

Разработана новая версия комплекса моделей, алгоритмов и программ, предназначенная для моделирования распространения микропластика (МП) в озере. Пластисфера – новый термин, который недавно появился в научной среде. Он отражает факт изменения экосистемы планеты под влиянием поступающего в нее пластика. Озеро Байкал, по распространению в его водах МП, практически не отличается от Великих Американских озер, где загрязнение МП началось значительно раньше, чем в Байкале. Пластик химически инертен, но его микрочастицы, попав в воду, способны аккумулировать присутствующие в воде токсичные органические вещества, а также тяжелые металлы. То есть МП практически становится в один ряд с другими загрязнителями озера. Поэтому мотивацией исследований является попытка оценить текущее состояние проблемы

с учетом специфики оз. Байкал. В этом случае целесообразно опираться на имеющиеся разработки в области математического моделирования процессов, протекающих в озере. В связи с большой степенью неопределенности, присущей всем составляющим процесса моделирования природных объектов, начиная от формулировок проблем и постановок задач и заканчивая интерпретацией результатов моделирования, естественно использовать сценарный подход, который позволяет получить вариантную оценку результатов в зависимости от задаваемых параметров. В отчетный период разработаны новые версии комплекса моделей и выполнены исследования в области моделирования распространения МП в сценарных расчетах с различными вариантами задания источников загрязнений, связанных с распространением МП, а также других параметров, участвующих в моделях. Моделирование выполняется на основе трехмерной негидростатической модели гидродинамики озера и модели распространения примесей. На рис. 8 показаны результаты расчетов распространения МП в период "открытой" воды. На них выделены участки, наиболее загрязненные МП в рассматриваемом сценарии.

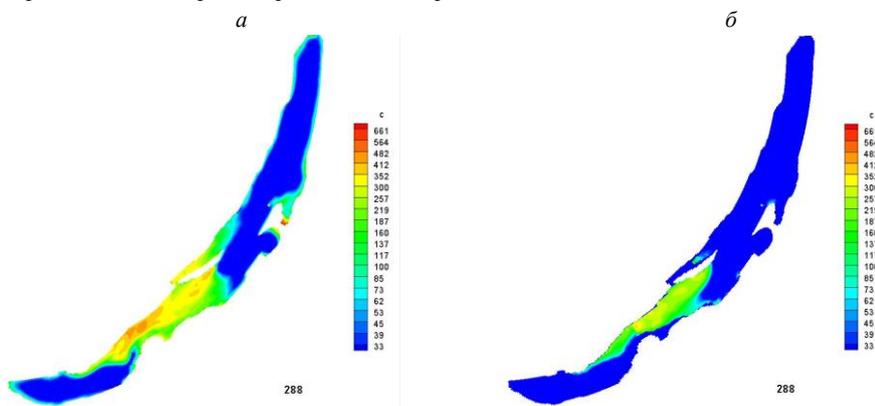


Рис. 8: Распределение МП в конце "климатического" августа:
а – в поверхностном слое; б – на глубине 50 м

4. Разработаны макеты высокопроизводительных технологий построения карт автоматической и контролируемой классификации больших объемов данных ДЗЗ.

Технологии обработки больших объемов данных ДЗЗ созданы на базе оригинальной разработки коллектива – программного комплекса обработки спутниковых данных PlanetaMonitoring. В рамках отчетного периода усовершенствованы программные модули автоматической классификации (кластерного анализа) алгоритмом *K*-средних и контролируемой классификации (классификации с обучением) на основе байесовской стратегии максимального правдоподобия для нормально распределенных векторов признаков (семь классификаторов: один поэлементный и шесть объектных), а также принципа минимума расстояния (два объектных классификатора).

В указанные модули введены: возможность сборки и исполнения кода модулей как 64-разрядных библиотек; параллельное исполнение вычислений в рамках стандарта OpenMP; возможность исполнения в автономном (пакетном) режиме для использования в качестве компонент распределенной системы облачных Web-сервисов.



б

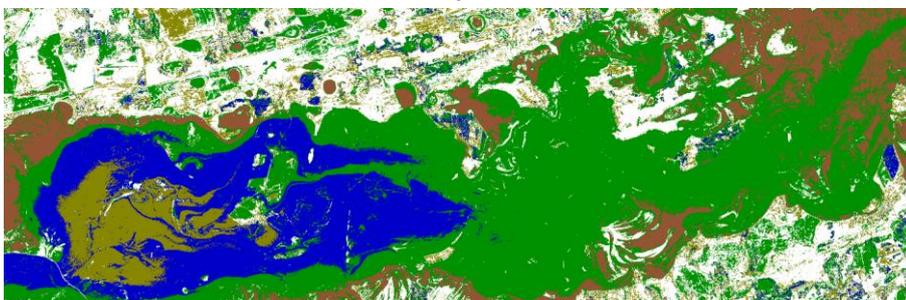


Рис. 9: Фрагмент космического снимка паводковой обстановки в Тюменской обл. (КА Sentinel-2, 11.05.2017 г.) (а); результат контролируемой классификации байесовским поэлементным классификатором; выделено 4 зоны затопления (б)

Реализовано расширение фреймворка обработки спутниковых данных на удаленной высокопроизводительной ЭВМ SSCCIP возможностью выполнения обработки на ЭВМ, оснащенной несколькими ускорителями Intel Xeon Phi.

Разрабатываемый фреймворк (программная платформа) обработки спутниковых данных на удаленной высокопроизводительной ЭВМ SSCCIP расширен возможностью выполнения обработки на удаленной ЭВМ, оснащенной несколькими ускорителями Intel Xeon Phi. Результат опирается на прошлогодние работы по расширению библиотеки ParImProLib возможностью распараллеливания вычислений одновременно с помощью технологий MPI и OpenMP.

Дополнительно выполнена интеграция системы SSCCIP с разрабатываемым фреймворком облачных технологий обработки ДЗЗ SSCCcloudIP, позволяющая создавать Web-сервисы, выполняющие обработку на удаленной суперЭВМ.

Разработан подход и макетные программные средства для синхронной визуализации картографических объектов всего Земного шара в "голографическом" режиме.

В результате проведенной работы представляется возможным построение видеоролика, демонстрирующего, например, динамику распределения населения на карте земного шара, что информационно обеспечивает четырехмерный поток данных, следуя идеям, заложенным в проекте "4D Anatomy".

Для визуализации четырехмерных объектов предлагается установить гомеоморфизм шара с объектами, находящимися на четырехмерной гиперсфере, средствами картографических проекций: задавая внутри шара соседние "слои" географическими картами, соответствующим "соседним" моментам времени, можно получить послойные параллели в четырехмерном

пространстве. Последовательно переходя между соседними слоями, можно визуализировать кинокартину в технологии, отображающей процесс изменения мира.

Решение задачи Радона на многообразиях ломаных (т. е. угловых структур); развитие масштабируемых масок выделения углов на многомерных сетках. Угловые структуры имеются на многих изображениях и являются объектом обнаружения в задачах обработки визуальных данных. Наряду с этими проблемами актуальной является задача Радона в электронной позитронной томографии, где данные комптоновского рассеяния являются интегралами по ломаным линиям, состоящим из двух отрезков. Близкая задача моделирования и учета рассеяния и изменения траектории гамма-фотонов существует и в рентгеновской томографии. В 2021 г. были получены масштабируемые маски для трехмерного случая как результат обобщения двумерной постановки. В отчетный период выполнено обобщение масштабируемых масок на угловые структуры в виде ломаных, или V-линий (V-lines). Также были продолжены исследования и опубликованы результаты применения сингулярного разложения преобразования Радона при устранении полосовых помех на спутниковых снимках и для других задач, связанных с регулярностью текстур.

Более подробно изложим результаты, относящиеся к рассмотрению шума, вызванного электрическими или электромеханическими помехами во время получения и передачи спутниковых изображений (так называемый "дрейф темновых токов"). В этом случае изображение получается с аддитивно наложенным искажением в виде пространственных синусоид различных частот. Традиционно такой шум может быть значительно уменьшен путем частотной фильтрации в области пространства Фурье. Преобразование Фурье синусоиды имеет вид парных сопряженных импульсов, расположенных в центрально-симметричных точках частотной области, соответствующих частотам синусоиды. Если амплитуды синусоидальной волны в пространственной области достаточно велики, можно ожидать, что эти пары будут заметны в спектре импульсов изображения, по одной на каждую синусоиду в исходном изображении. Таким образом, периодический шум может быть проанализирован и отфильтрован довольно эффективно с использованием частотных методов. Подход сводится к использованию селективных фильтров (режекторный, полосовой и узкополосный), способных изолировать шум.

Реализован альтернативный подход на основе преобразования Радона и его сингулярного разложения (SVD) в суммы плоских волн для устранения помехи в виде интерференции полос. Мотивацией использования преобразования Радона является наблюдение, что последовательность полос является плоской волной. Нам нужно извлечь одну плоскую волну (или несколько соседних) из зашумленного изображения. По сравнению с частотным подходом проекции пространства Радона еще сохраняют свою связь с пространственной геометрией.

Проиллюстрируем пример расчета реконструкции SVD для реальной задачи удаления полосовых помех на изображении. На рис. 10а представлено изображение колец Сатурна, переданное межпланетной станцией Кассини, подверженное полосовому шуму. Оно обозначается как z и трактуется как сумма полезных неизвестных образов u , на которые накладывается полосовая помеха v , а образ $z = u + v$ есть образ, наблюдаемый системой регистрации и передачи данных дистанционного зондирования. Искажения, накладываемые полосами, неизвестны. Однако заранее известны их направления, они представляют собой параллельные горизонтальные линии.

Добавлено примечание ([O2]): Текст поправлен, проверьте

Изображение колец Сатурна (рис. 10а) и его преобразование Радона, или синограмма, представляют собой изображения 512×512 . Отсчеты ("детекторы") расположены построчно сверху вниз и составляют горизонтальную ось (рис. 10б). Реконструкция, или SVD-решение минимальной нормы, показана на рис. 10в, а разницу между изображением z и его аппроксимацией Z можно увидеть на рис. 10г. Аппроксимация Z получена выбрасыванием (обнулением) одной информативной проекции в синограмме, отвечающей за присутствие помехи, и применением SVD-восстановления к оставшимся проекционным данным.

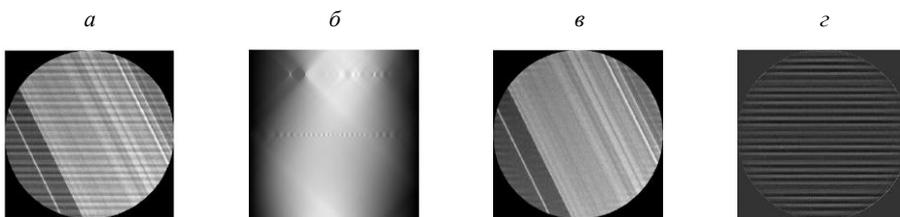


Рис. 10: Кольца Сатурна, снимок, переданный с космической станции Кассини: а – изображение $z = u + v$ является суммой искомого изображения (u), зашумленного параллельными полосами v ; б – преобразование Радона (синограмма); в – результат Z приближения на основе SVD; г – разность изображений а и в, т. е. аппроксимация полосовой помехи

Результаты работ по проектам РФФИ

Проект РФФИ № 20-01-00560 "Алгоритмы последовательного продолжения с оценкой неопределенностей в задачах обратного моделирования для природоохранной тематики"

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

Продолжена разработка методологии решения задач природоохранного прогнозирования и проектирования, которые формулируются как математические задачи продолжения. Суть подхода заключается в том, что функция состояния модели исследуемых процессов восстанавливается по неполной информации с помощью алгоритмов, идентифицирующих функции неопределенности, дополнительно введенных в модель. Выбор множества допустимых функций неопределенности позволяет регулировать свойства решений. В результате задача о поиске функции неопределенности становится вспомогательной для продолжения функции состояния из наблюдаемой области в ненаблюдаемую. Причем продолжение возможно в широком смысле: по пространству, времени или даже по компонентам функции состояния. Кроме функций неопределенности в нашем подходе существенное значение имеют функции чувствительности целевых функционалов, отвечающих за конкретные цели исследований.

В ходе выполнения проекта были рассмотрены следующие задачи:

1. Сформулирована общая методология решения задач последовательного продолжения в рамках вариационного принципа в формулировках со слабыми ограничениями. Наряду с оптимизационным мы развиваем также подход с использованием операторов чувствительности и ансамблей решений сопряженных уравнений. Описаны базовые алгоритмы решения задач продолжения с использованием метода расщепления и методов конечных элементов/объемов на основе уравнения конвекции-диффузии-реакции.

2. Разработаны последовательные алгоритмы продолжения в различных формулировках. В том числе изучались задачи продолжения для нелинейных моделей с многокомпонентными функциями состояния. В качестве функций неопределенности выступали правые части моделей (источники) и коэффициенты операторов трансформации примесей. Для идентификации функций неопределенности использовались оптимизационные метаэвристические и градиентные алгоритмы, а также алгоритмы на основе ансамблей решений сопряженных уравнений и операторов чувствительности. **Выполнено численное сравнение** различных постановок обратных задач и задач усвоения данных, которые рассматривались как последовательные решения связанных обратных задач.
3. Выполнен анализ разработанных алгоритмов в контексте решения природоохранных задач. Численные эксперименты показали, что во многих практических постановках относительная ошибка оценки функции состояния модели может быть существенно меньше, чем ошибка восстановления функции неопределенности, например в источниках. Это можно объяснить тем, что часть функции неопределенности, выбранной исследователем, может быть ненаблюдаемой по имеющимся данным. Так, в случае устойчивого направленного переноса примесь уносится ветровыми потоками и не попадает на датчики системы наблюдений. Тем не менее, поиск функции неопределенности в заданных множествах позволяет контролировать получаемое решение задачи продолжения и сохранять его физический смысл и, следовательно, возможность содержательной интерпретации и **использования** в других моделях. Еще один существенный вывод: в наших численных экспериментах решение классической обратной задачи продолжения на интервале времени не обязательно давало результаты лучше, чем задача последовательного усвоения данных в окнах усвоения несмотря на то, что последняя была более ограниченной в количестве данных измерений. Это может объясняться усложнением поведения решения при увеличении количества неизвестных, например появлением большего числа локальных минимумов целевого функционала невязки.

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 1.10.2020)

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

Крупномасштабные обратные задачи нуждаются не только в эффективных алгоритмах, но и в их реализации на современной вычислительной инфраструктуре. Алгоритмы идентификации источников примесей в атмосфере и оценки информативности разнородных данных мониторинга на основе ансамблей решений сопряженных уравнений и операторов чувствительности (разработанные на предыдущих этапах выполнения проекта проекта) в отчетном году адаптированы к выполнению на высокопроизводительных вычислительных системах с распределенной памятью. Это позволяет уменьшить время обработки данных мониторинга, использовать для интерпретации данных более детальные модели адвекции-диффузии-реакции примесей в атмосфере и обрабатывать большее количество разнородных данных.

Эффективность распараллеливания была изучена в сценарии обратного моделирования для региона оз. Байкал. Реализация значительно сокращает время моделирования сценария с нескольких дней до десятков минут и обеспечивает удовлетворительную масштабируемость до 200 исполняемых потоков. Показано, что запуск двух процессов MPI на двухпроцессорном узле с

привязкой к процессору обеспечивает лучшую производительность, чем настройка одного процесса на узел, несмотря на избыточность вычислений. Таким образом, достигнутые результаты способствуют более широкому применению алгоритмов обратного моделирования в крупномасштабных исследованиях.

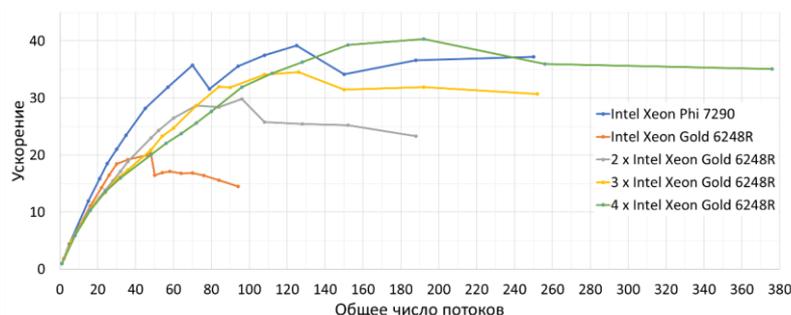


Рис.11. Ускорение решения обратной задачи идентификации источников выбросов в Байкальском регионе по разнородным данным измерений качества воздуха на различных конфигурациях кластера НКС-1П ССКЦ.



Рис. 12: Продолжительность последовательного и параллельного решения обратной задачи на различных конфигурациях кластера НКС-1П ССКЦ

Кроме того, на данном этапе представлена версия интерфейсов в виде WPS сервисов. Так как установка и настройка разработанной системы обратного моделирования – это достаточно сложная техническая задача, то представление результатов разработки алгоритма в виде прикладных WPS сервисов с веб-интерфейсом позволяет привлечь к использованию алгоритмов более широкий круг исследователей и пользователей.

Публикации

Монографии, главы в монографиях

1. Методы математического моделирования для цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки // *Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной*

территории. Сер.: Интеграционные проекты СО РАН / Пененко А. В., Рапута В. Ф., Огородников В. А., Пененко В. В., Акентьева М. С., Амикишиева Р. А., Гочаков А. В., Каргаполова Н. А., Леженин А. А., Пьянова Э. А., Скорик В. С. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2022. С. 294–333.

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Penenko, A.; Rusin, E. Parallel implementation of a sensitivity operator-based source identification algorithm for distributed memory computers // *Math.* 2022. No 10. 4522. <https://doi.org/10.3390/math10234522>.

2. Kazantsev I. G., Turebekov R. Z. Sultanov, M. A. Inpainting of regular textures using ridge functions // *J. Inverse and Ill-posed Problems.* 2022. V. 30, No 5. P. 759–766. <https://doi.org/10.1515/jiip-2021-0053>.

3. Penenko, A. V., Konopleva, V. S., Penenko V. V. Comparison of inverse and data assimilation problems in the inverse modeling of atmospheric chemistry // *Proc. SPIE 12341, 28th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 123416O (2022)* <https://doi.org/10.1117/12.2644951>.

4. Pyanova, E. A., Gochakov, A. V. Modeling of atmospheric circulation and transport of impurities from natural and industrial sources in the Baikal region // *Proc. SPIE 12341, 28th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics 123415T (2022)*. <https://doi.org/10.1117/12.2644606>.

5. Yudin, M. S. Bifurcation effects in finite element simulation of atmospheric fields in and above a forest stand // *Proc. SPIE 12341, 28th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 123416V (2022)* <https://doi.org/10.1117/12.2645118>.

6. Tsvetova, E. Transport model: microplastic in Lake Baikal // *Proc. SPIE 12341, 28th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics; 1234165 (2022)* <https://doi.org/10.1117/12.2644796>.

7. Penenko, V. V. Notes on environmental forecasting in the current conditions // *Proc. SPIE 12341, 28th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics; 123416U (2022)* <https://doi.org/10.1117/12.2645093>

8. Zubairova, U. S., Kravtsova, A. Yu., Romashchenko, A. V., Pushkareva, A. A., Doroshkov, A. V. Particle-based imaging tools revealing water flows in maize nodal vascular plexus // *Plants.* 2022. V. 11, iss. 12. 1533 DOI: 10.3390/plants11121533.

9. Bobrovskikh, A. V., Zubairova, U. S., Bondar, E. I., Doroshkov, A.V., Lavrekha, V. V. Transcriptomic data meta-analysis sheds light on high light response in *Arabidopsis thaliana* L. // *Intern. J. Molec. Sci.* 2022. V. 23, iss. 8. 4455 DOI: 10.3390/ijms23084455.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Kazantsev, I. G., Turebekov, R. Z., Sultanov, M. A. Restoration of images corrupted by stripe interference using Radon domain filtering // *Sib. Electron. Math. Rep.* 2022. V. 19, No. 2. P. 540–547. DOI: <https://doi.org/10.33048/semi.2022.19.045>.

2. A V Penenko, V S Konopleva and V V Penenko Inverse modeling of atmospheric chemistry with a differential evolution solver: Inverse problem and Data assimilation // 2022 IOP Conf. Ser.: *Earth Environ. Sci.* 1023 012015 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1023/1/012015>:

3. Penenko, A., Penenko, V., Tsvetova, E., Gochakov, A., Pyanova, E., Konopleva, V. Sensitivity operator-based approach to the interpretation of heterogeneous air quality monitoring data // *LNCS*

(including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2022. 13127. P. 164–171. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97549-4_19.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Yarovenko, I. P., Kazantsev, I. G. An extrapolation method for improving the linearity of CT-values in X-ray pulsed tomography // Far Eastern Math. J. 2022. V. 22, No. 2. P. 269–275. <https://doi.org/10.47910/FEMJ202238>.

2. Kadyroldina, A. T., Orazova, A. Zh., Krasavin A. L., Kazantsev, I. G., Dyomina I. A., Alontseva, D. L. Development of new control algorithms for a robotic arm equipped with a 3D scanning or machine vision system // Bull. D. Serikbayev of EKTU. 2022. No 1. P. 39–59. https://doi.org/10.51885/1561-4212_2022_1_39.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Томск, 4–8 июля 2022 г. – 7 докладов (Пененко В. В., Пененко А. В., Русин Е.В., Курбацкая Л. И., Пьянова Э. А., Цветова Е. А., Юдин М. С.).

2. 21-я Международная конференция по методам аэрофизических исследований, Новосибирск, 8–14 августа 2022 г. – 1 доклад (Курбацкая Л. И.).

3. Технопром 2022, Новосибирск, 23–25 августа 2023 г. – 1 доклад (Пененко А. В.).

4. ENVIROMIS-2022, Томск, 12–17 сентября 2022 г. – 1 приглашенный доклад (Пененко А. В., Русин Е. В., Скорик В. С., Пененко В. В.).

5. Международная конференция "Суперкомпьютерные дни в России" в рамках конгресса "Суперкомпьютерные дни в России", Москва, 26–27 сентября 2022 г. – 2 доклада (Марченко М. А., Пененко А. В., Русин Е. В.).

6. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2022" (МНЧ-2022), Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. – 9 докладов (Пененко В. В., Пененко А. В., Русин Е. В., Казанцев И. Г., Курбацкая Л. И., Пьянова Э. А., Цветова Е. А., Юдин М. С.).

7. 29-я рабочая группа "Аэрозоли Сибири", Томск, 22–25 ноября 2022 г. – 7 докладов (Пененко В. В., Пененко А. В., Русин Е.В., Курбацкая Л. И., Пьянова Э. А., Цветова Е. А., Юдин М. С.).

8. 38-я международная конференция "Ляпуновские чтения", Иркутск, 5–9 декабря 2022 г. – 1 доклад (Пененко В. В., Пененко А. В., Русин Е.В., Пьянова Э. А., Цветова Е. А.).

9. Научная конференция "Современные проблемы обратных задач", Новосибирск, 19–23 декабря 2022 г. – 2 доклада (Казанцев И. Г.).

10. Научная конференция "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология" в рамках 18-го Международного научного конгресса "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 18–20 мая 2022 г. – 5 докладов (Пененко В. В., Пененко А. В., Курбацкая Л. И., Пьянова Э. А., Цветова Е. А.).

Участие в оргкомитетах конференций

1. Пененко В. В.:

Добавлено примечание ([u3]): Нужно добавить тезисы конференции МНЧ, они короткие, но есть DOI

- член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2022" (МНЧ-2022), Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.,
- член программного комитета 29-й рабочей группы "Аэрозоли Сибири", Томск, 22–25 ноября 2022 г.,
- член программного комитета 28-го Международного симпозиума "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Томск, 4–8 июля 2022 г.;

2. Пененко А. В.:

- член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2022" (МНЧ-2022), Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.,
- член программного комитета ENVIROMIS-2022, Томск, 12–17 сентября 2022 г.;

3. Русин Е. В.:

- член оргкомитета научной конференции "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология" 18-го Международного научного конгресса "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 18–20 мая 2022 г.

4. Пьянова Э. А. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2022" (МНЧ-2022), Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 9

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 12

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 14

Докладов на конференциях – 36, в том числе 1 пленарный

Участников оргкомитетов конференций – 7

Не все статьи до настоящего времени процитированы в базах, но к моменту публикации книги скорее всего будут. По крайней мере так было в прошлом году

Добавлено примечание (u4): Присылайте информацию по мере поступления, постараюсь вставить в отчет

Кадровый состав

1. Пененко В. В.	зав. лаб.	д.ф.-м.н.
2. Бучнев А. А.	с.н.с.	к.т.н.
3. Зубаирова У. С.	н.с.	к.б.н.
4. Казанцев И. Г.	в.н.с.	д.ф.-м.н.
5. Курбацкая Л. И.	с.н.с.	
6. Пененко А. В.	в.н.с.	д.ф.-м.н.
7. Пьянова Э. А.	н.с.	к.ф.-м.н.
8. Русин Е. В.	с.н.с.	к.т.н.
9. Цветова Е. А.	в.н.с.	к.ф.-м.н.
10. Юдин М. С.	с.н.с.	
11. Скорик В. С.	инж.	
12. Иванова Г. И.	техник	

Педагогическая деятельность

Пененко В. В. – профессор НГУ

Пененко А. В. – ст. преподаватель НГУ

Руководство студентами

Скорик В. С. – 2-й год магистратуры ММФ НГУ, руководитель Пененко А. В.

Сортоева К. С. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Пененко А. В.

19

Кардаш Р. Д. – 3-й курс ММФ НГУ, руководитель Пененко А. В.
Артемчик Г. О. – 3-й курс ММФ НГУ, руководитель Пененко А. В.
Емельянов М. К. – 3-й курс ММФ НГУ, руководитель Пененко А. В.
Цыбенова З. В. – 3-й курс ММФ НГУ, руководитель Пененко А. В.

Защита дипломов

Скорик (Коноплева) Виктория Сергеевна – магистр ММФ НГУ, руководитель Пененко А. В.

Награды

Д.ф.-м.н. Пененко А. В. – лауреат именной премии Правительства Новосибирской обл. в 2022 г. за работу "Алгоритмы идентификации источников загрязнений для моделей качества воздуха различной сложности с использованием операторов чувствительности и гетерогенных данных мониторинга".