

ЛАБОРАТОРИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В АТМОСФЕРЕ И ГИДРОСФЕРЕ

Зав. лабораторией д.ф.-м.н. Платов Г. А.

Важнейшие достижения

Исследование долгопериодной изменчивости процесса обрушения планетарных волн Россби в окрестности субтропического струйного течения

Д.ф.-м.н. Крупчатников В. Н.

На основе численного алгоритма идентификации обрушения волн Россби (RWB), который определяет момент и место опрокидывания контуров изоэнтропической потенциальной завихренности, исследуется динамика процессов антициклонического (АС-тип) и циклонического (С-тип) опрокидывания волн Россби в районе субтропического струйного течения Северного Полушария в исторический период 1979–2018 гг. Для идентификации явления RWB использованы данные из архива реанализа ERA-Interim. Результаты исследования показали, что интенсивность АС-типа RWB имеет положительный тренд изменчивости (рис. 1а), а С-тип RWB – отрицательный (рис. 1б).

Волны Россби оказывают сильное влияние на формирование погоды в средних широтах. RWB связано с характеристиками струйных течений, фазой Арктического колебания, внезапным стратосферным потеплением и блокирующими явлениями. Атмосферные блокинги представляют собой квазистационарный гребень волны Россби большой амплитуды, который блокирует движение циклонов. Зачастую они связаны с квазистационарными антициклонами синоптического масштаба большой амплитуды во внетропических широтах. Полученные результаты позволяют сделать вывод о росте явлений блокирования, связанных с региональной экстремальной погодой – волнами тепла в летний и холода в зимний сезон.

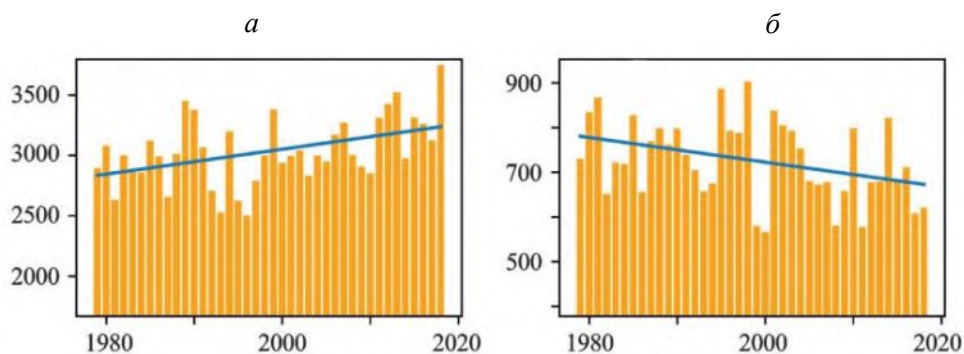


Рис. 1: Межгодовая изменчивость интенсивности RWB: АС-тип RWB (а); С-тип RWB (б)

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Gochakov, A. V., Antokhina, O. Yu., Krupchatnikov, V. N., Martynova, Yu. V. Long-term variability of Rossby wave breaking in the subtropical jet stream area // Russ. Meteorol. and Hydrol. 2022. V. 47, No. 2. P. 79–88. DOI:10.52002/0130-2906-2022-2-5-19.

2. Martynova, Yu. V., Krupchatnikov, V. N, Gochakov A. V., Antokhina, O. Yu. Relationship between anomalies of the rate of snow cover formation in Western Siberia and atmospheric dynamics in the Northern Hemisphere in the autumn–winter season // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2022. V. 58, No. 1. P. 95–109. DOI: 10.1134/S0001433822010078.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым 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 2

Руководитель д.ф.-м.н. Платов Г. А.

Этап 2022 г.

На этапе 2022 г. работы велись по следующим направлениям:

1. Включение или модернизация биогеохимических блоков модели климатической системы Земли.

Для учета биохимических процессов в численной модели SibCIOM (Siberian Coupled Ice-Ocean Model) осуществлено подключение платформы FABM (Framework for Aquatic Biogeochemical Models), объединяющей в себе набор различных биогеохимических моделей. Она была представлена в 2014 г. в качестве промежуточного слоя между биогеохимическими и гидродинамическими моделями (от 1D до 3D). FABM использует язык Fortran, и его исходный код является открытым.

В таком варианте океаническая и биохимическая модели работают независимо друг от друга. К тому же по взаимному требованию происходит обмен данными между гидродинамической и биогеохимической составляющими.

Компоненты FABM были добавлены к совместной модели океана и морского льда SibCIOM в виде подключаемой библиотеки. Дополнительно созданы процедуры обмена данными между гидродинамической составляющей и биогеохимическим блоком. Океаническая модель предполагает механизм включения биогеохимических индикаторов, определенных FABM, в свои выходные данные вместе с любыми диагностическими переменными, определенными биогеохимическими моделями. Общая структура биогеохимической модели с переменными состояния, выраженными в виде усредненных по ансамблю концентраций, определяется системой уравнений диффузии-адвекции. Значения переменных состояния инициализируются в начале моделирования и изменяются во времени путем интегрирования их основных уравнений. По требованию океанической модели FABM предоставляет обновленные значения переменных состояния и их потоков.

К переменным состояния могут относиться концентрации мелких водных организмов и растений, щелочность воды, насыщение кислородом, концентрация взвеси, концентрация различных солей (аммония, фосфата и т. д), концентрация растворенного неорганического CO₂, pH воды и т. д. FABM также позволяет биогеохимическим моделям передавать скорости вертикального перемещения (всплывание или погружение) переменных биогеохимического состояния, которые океаническая модель должна перевести в остаточный член вертикальной адвекции и решить. Кроме того, FABM поддерживает различные типы обратных связей, включая поглощение света, приводящее к выработке тепла, и изменения в поверхностном альбедо и сопротивлении ветра.

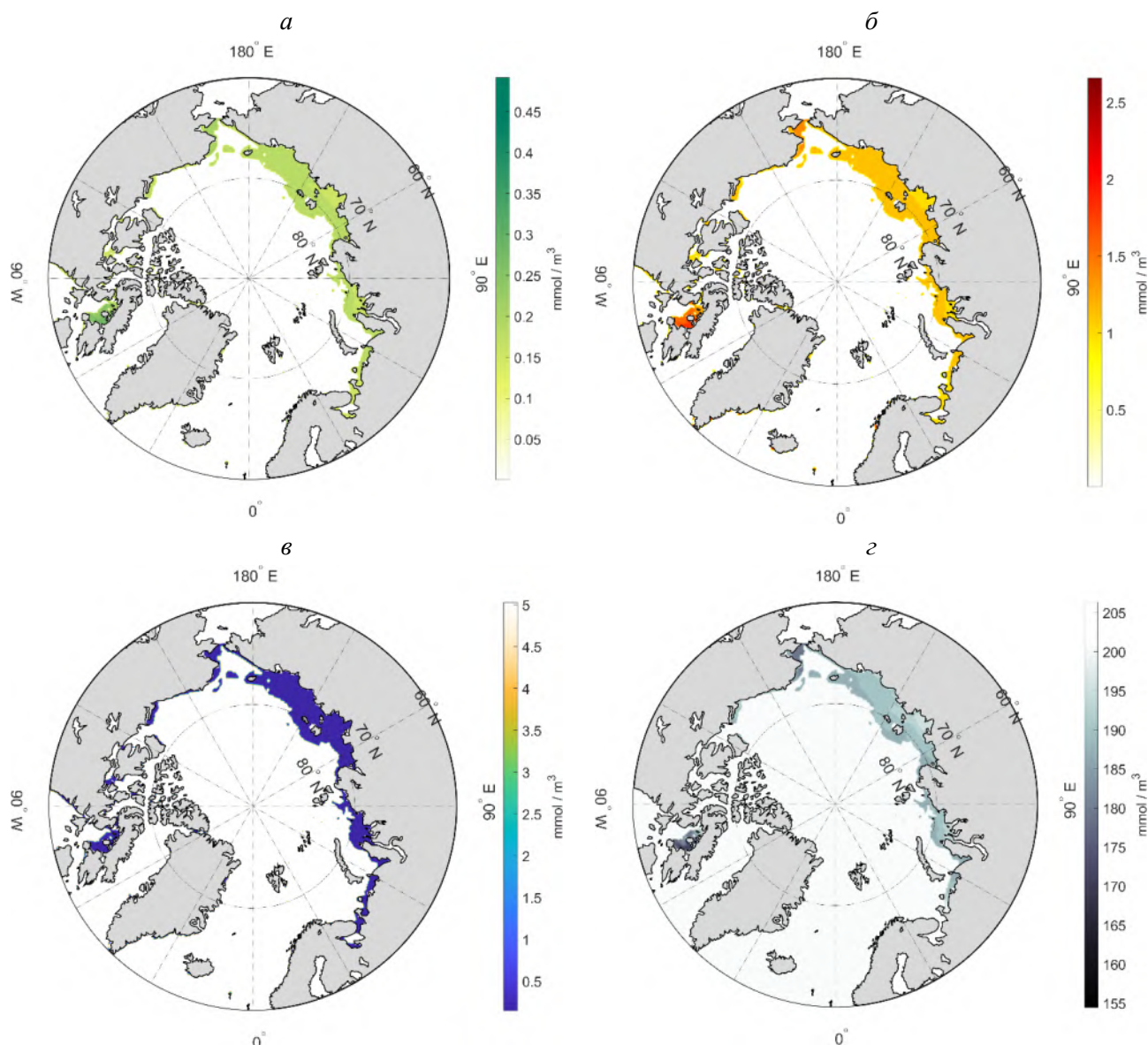


Рис. 2: Поверхностное распределение осредненных за год модельного расчета концентраций фитопланктона (а), зоопланктона (б), нутриентов (в), кислорода (z)

Структура FABM позволяет подключать любую биохимическую модель из доступного списка к океанической. На данный момент произведен тестовый запуск численной модели SibCIOM с подключенной биогеохимической моделью BioPlast, представляющую собой модель трансформации микропластика в водной среде, включая биообрастание частицами микропластика, заглатывание и выброс зоопланктоном и перенос микропластика в детрите. В данной модели за моделирование функциональных групп планктонов, растворенных и твердых органических веществ, питательных веществ, растворенного кислорода отвечает модель OxyDer, которая также отдельно доступна в FABM.

В качестве результатов тестовых расчетов на рис. 2 представлены поверхностные распределения концентрации фитопланктонов, зоопланктонов, нутриентов и кислорода в Северной Атлантике и Северном Ледовитом океане.

2. Разработка модели речного стока для регионального моделирования и прогноза развития паводков.

Поток пресной воды из рек в океаны играет важную роль в обмене водой и энергией между сушей, атмосферой и океанами. Он изменяет соленость вод океана и может влиять на термохалинную циркуляцию. Маршрутизация стока, т. е. моделирование потока пресной воды из рек, обеспечивает основу для сравнения и проверки оценок стока из моделей общей циркуляции (МОЦ) с данными наблюдаемых гидрографов. При условии, что осадки и другие атмосферные переменные из реанализов и МОЦ реалистичны, оценки речного стока могут быть использованы для оценки адекватности схемы параметризации поверхности суши, а также для оценки влияния изменений климата на гидрологию крупных речных бассейнов и водные ресурсы.

Для моделирования гидрографа стока в замыкающем створе речного русла составляющие поверхностного Q_S и подземного Q_G стоков, представляющие мгновенный сток в центре расчетной ячейки, необходимо трансформировать в пределах расчетной ячейки или малого водосбора. Такая трансформация проводится на основе линейной резервуарной модели (вариант модели Калинина – Милюкова) до выхода из расчетной ячейки и для попадания в те или иные участки модельной гидрографической сети с учетом времени добегания. Значения стока с поверхностных расчетных ячеек служат входной информацией для модели маршрутизации стока в речной сети. Для последующего моделирования стока применяется линейная модель формирования водного баланса в русловой сети.

В предыдущем варианте схемы маршрутизации поверхностного стока использовалась постоянная скорость речного потока. Такой подход оказался приемлемым для моделирования средних долгосрочных расходов воды, т. е. в месячном и более длительном временном масштабе. Однако для моделирования краткосрочных, суточных колебаний речного стока, паводков, для определения количества стока вдоль реки в различные моменты времени требуется скорость, изменяющаяся во времени, которая зависит от количества стока, генерируемого в ячейке сетки суши. Поскольку скорость речного потока имеет важное значение для моделирования гидрографов стока и времени пребывания воды в гидрологической системе, то с целью улучшения маршрутизации потока в работе реализован метод переменной скорости потока на сетке $(1/3 \times 1/3)^\circ$.

Для моделирования речного стока применяется линейная модель формирования водного баланса в русловой сети. В соответствии со схематизированной в виде графа модельной гидрографической сетью рассчитывается динамика запасов и расходов воды в каждой ячейке на основе уравнения неразрывности.

Для случая переменной скорости потока предполагается аппроксимация поперечного сечения русла реки в виде прямоугольника с площадью сечения $A = Dh$, где D – ширина реки, h – глубина. Если воспользоваться аппроксимацией для расхода воды в прямоугольном русле, то нетрудно получить формулу для переменной по времени скорости потока.

Для оценки ширины реки D используется известная геоморфологическая зависимость. Тогда решение уравнения неразрывности для поверхностного запаса воды W содержит переменную по времени русловую скорость потока.

Анализ численных экспериментов показал (рис. 3а), что скорость потока может достигать в сезон высокого стока (половодье) $\sim 4,5$ м/с, в то время как в сезон низкой воды ее значение не превышает 2,1 м/с. Эти величины сопоставимы с реальными значениями скорости. Сравнение суточных наблюдаемого и модельного гидрографов (рис. 3б) позволяет заключить, что климатическая модель воспроизводит суточные колебания речного стока в р. Лене.

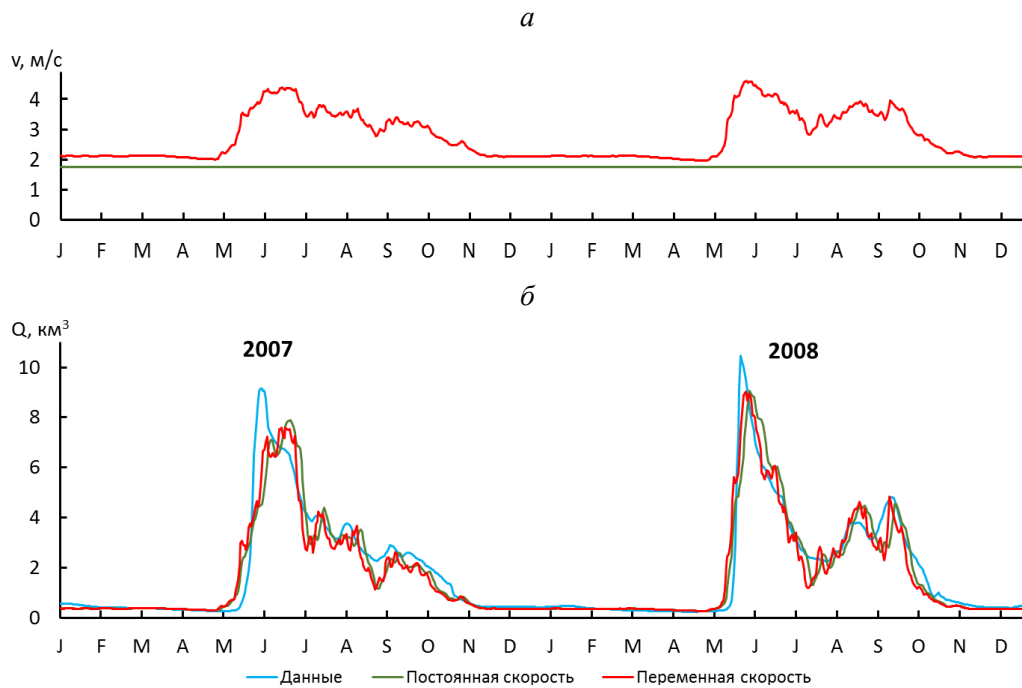


Рис. 3: Гидрографы на г/п Кюсюр за 2007–2008 гг.: постоянная и переменная скорости, соответствующие модельным расчетам (а); суточные наблюдаемый и модельные гидрографы с постоянной и переменной скоростями (б)

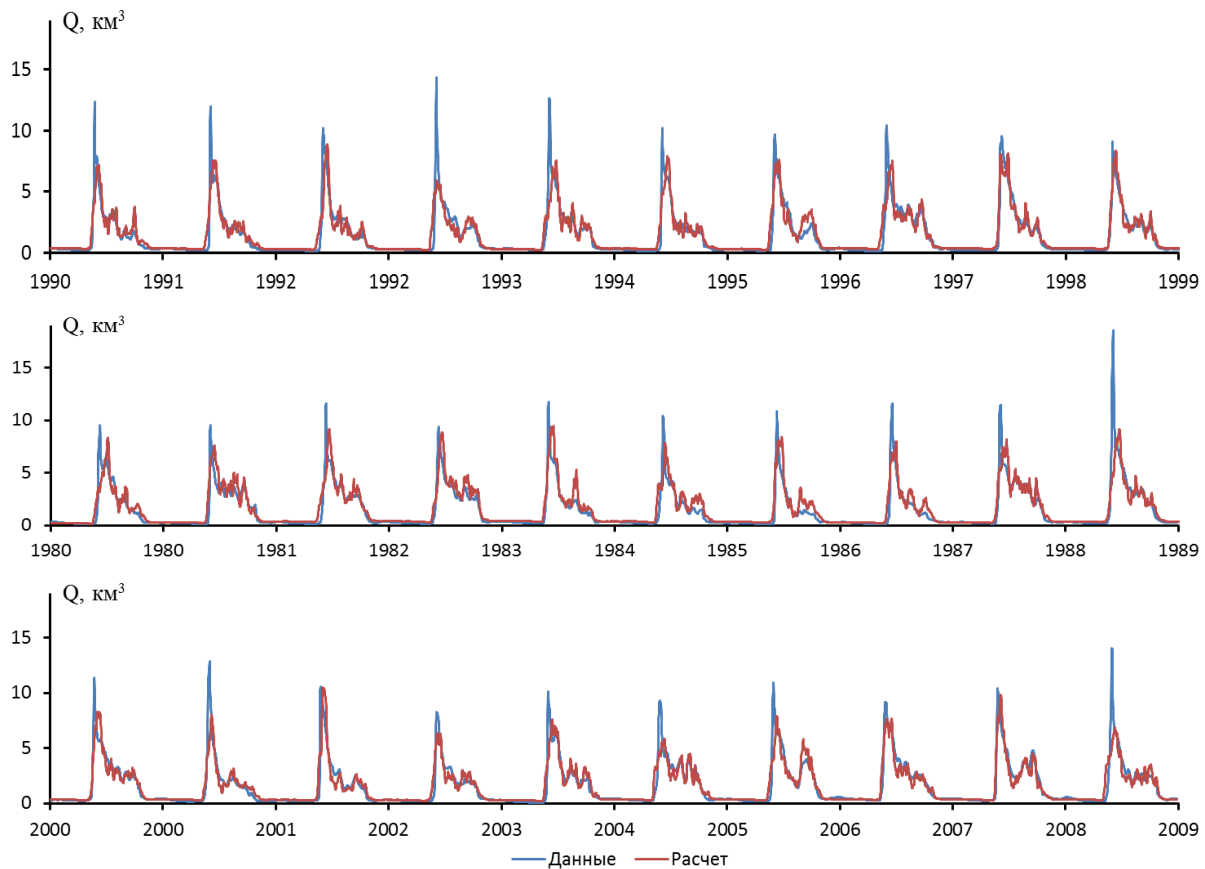


Рис. 4: Суточные наблюдаемый и модельные гидрографы с переменной скоростью потока на г/п Кюсюр за 1980–2009 гг.

Отметим, что смоделированный речной сток на г/п Кюсюр (рис. 4) отличается от наблюдаемых расходов как по величине, так и по фазе максимального стока за некоторые годы исследова-

дуемого периода. Ошибки могут быть связаны с входными данными формирования стока, т. е. в основном с осадками и использованием параметризаций в модели маршрутизации реки. Работа выполнялась с использованием данных реанализа MERRA, известно, что осадки из данного реанализа для бассейна р. Лены недооценены, а это влечет систематические ошибки в моделируемых речных стоках.

3. Расширение модели процессов в грунте блоком по расчету гидратонасыщенности донных отложений с учетом фазовых переходов.

Вечная мерзлота занимает большую площадь в Арктическом регионе как в континентальной области, так и на обширных территориях шельфа арктических морей. Многолетняя мерзлота содержит большое количество газа в гидратной форме. Метангидраты могут образовываться и существовать внутри зоны стабильности гидратов метана (ЗСГМ) в течение длительного времени. Существование метангидратов в верхних слоях мерзлых толщ в неравновесных условиях считается одной из возможных причин постоянных газопроявлений при эксплуатации скважин на газовых месторождениях Ямала, а также представляет опасность при освоении недр арктического шельфа.

Рассматривается одномерный процесс разложения газогидратов в пористой среде. На каждом шаге по времени проверяется стабильность гидратов путем сравнения вновь рассчитанной температуры T на каждой глубине с температурой диссоциации гидратов на этой глубине T_{diss} . Гидраты начинают диссоциировать, когда T превышает T_{diss} . Диссоциация газовых гидратов, как и таяние льда, включает фазовый переход и идет с поглощением тепла. В этом исследовании принят упрощенный подход для учета потребления скрытой теплоты, известный как метод интеграции тепла. Предполагается, что в процессе нарушения условий стабильного существования гидрата формируется фронт диссоциации. На фронте температура принимается равной температуре диссоциации гидрата T_{diss} . Учет потери тепла выражен путем добавления слагаемого $s(z, t)$ в уравнение теплопроводности:

$$\rho C \partial T(z, t) / \partial t = \partial / \partial z (\lambda \partial T(z, t) / \partial z) + s(z, t)$$

Тепло, необходимое для полного разложения газогидрата, находящегося в единице объема пород, составляет величину $(m \cdot h \cdot \rho_h \cdot L_h)$, где m , h , ρ_h , L_h – соответственно пористость, гидратонасыщенность, плотность, удельная теплота разложения газогидрата ($L_h = 430$ кДж/кг), λ – теплопроводность грунта на соответствующей глубине.

На глубине диссоциации гидрата грунт отдает тепло в количестве $\rho C \Delta T = \rho C (T - T_{diss})$, где ρC – объемная теплоемкость грунта (Дж/м³К). Полагая, что тепло расходуется на разложение газогидрата, можем записать условие баланса тепла: $\rho C \Delta T = m \rho_h L_h (h(t) - h(t+1))$.

Следовательно, чтобы температурного запаса ΔT слоя грунта хватило на полное разложение газогидрата, $h(t) = 0$, должно выполняться условие $\rho C \Delta T / m \rho_h L_h \geq h(t)$. Таким образом, если исходная гидратонасыщенность меньше этого значения, то теплового запаса грунта достаточно для полного разложения гидрата, находящегося в поровом пространстве за один шаг по времени. Если же условие не выполняется, то температурный запас ΔT расходуется лишь на снижение гидратонасыщенности. Изменение гидратонасыщенности во время этого процесса аппроксимируется следующим образом: $h(t+1) = h(t) - \rho C \Delta T / m \rho_h L_h$.

Слагаемое, описывающее потери тепла, зависит от теплоты диссоциации газогидрата и интенсивности его разложения: $s(z, t) = -m \rho_h L_h \partial h(t) / \partial t$.

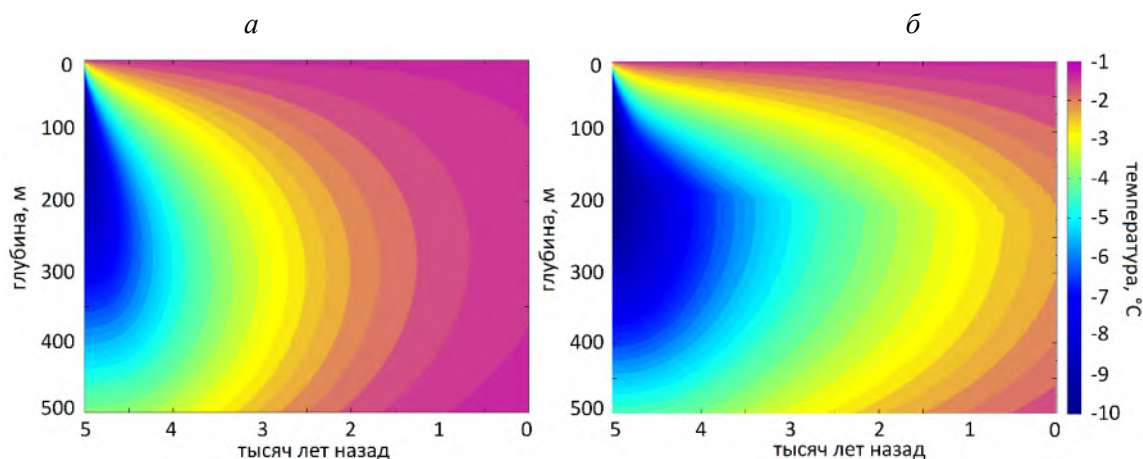


Рис. 5: Изменение поля температур за последние 5 тыс. лет, полученное по результатам численных экспериментов SH0 (а) и SH20 (б)

С использованием описанного метода проведено исследование разложение гидратонасыщенной залежи, образовавшейся в условиях ЗСГМ. Формирование гидратов может происходить при достижении термобарических условий в водонасыщенных породах с высоким газосодержанием либо в результате миграции газа из нижележащих газоносных слоев в зону стабильности гидрата. Численные эксперименты проводились для шельфа моря Лаптевых с глубиной воды 10 м. Были проведены два численных эксперимента: SH0 – моделирование стабильности гидрата метана выполнено без гидратов в осадке, гидратонасыщенность $h = 0\%$; SH20 – предполагается формирование газогидратной залежи в верхней части ЗСГМ в период максимального промерзания отложений (20 тыс. лет назад), гидратонасыщенность $h = 20\%$. Разложение гидрата происходит с затратой тепла.

Анализ проведенных экспериментов с учетом гидратонасыщенности пород показал, что эндотермическая реакция является важным механизмом замедления диссоциации гидратов в мерзлых отложениях. Дегградация гидратов происходит за счет аккумулированного в них тепла, поскольку тепловой поток от окружающих пород незначителен. Вследствие процесса диссоциации гидрата замедляется распространение температурного импульса по осадочной толще и снижается скорость дегградации как многолетнемерзлого слоя, так и залежей метангидратов (рис. 5). Процесс дегградации газовых гидратов приводит к поглощению тепла, способствуя снижению температуры близлежащих пород (рис. 5б). Существуют различия между SH0 и SH20 как по скорости диссоциации, так и по температуре пород. Породы вблизи фронта дегградации гидрата охлаждаются. В области разложения гидратов сохраняются более низкие температуры $-2...-3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4. Создание моделей оценивания полей концентраций от площадных источников примесей.

Крупными источниками атмосферного загрязнения являются предприятия по производству цемента. Их выбросы представляют значительный риск для здоровья населения и окружающей среды.

На основе экспериментальных исследований и спутниковых наблюдений загрязнения снежного покрова в окрестностях Искитимского цементного завода установлены количественные связи между снеговым индексом NDSI и выпадениями взвешенных веществ, ионных компонентов. Расположение источников и схема отбора снеговых проб приведены на рис. 6.

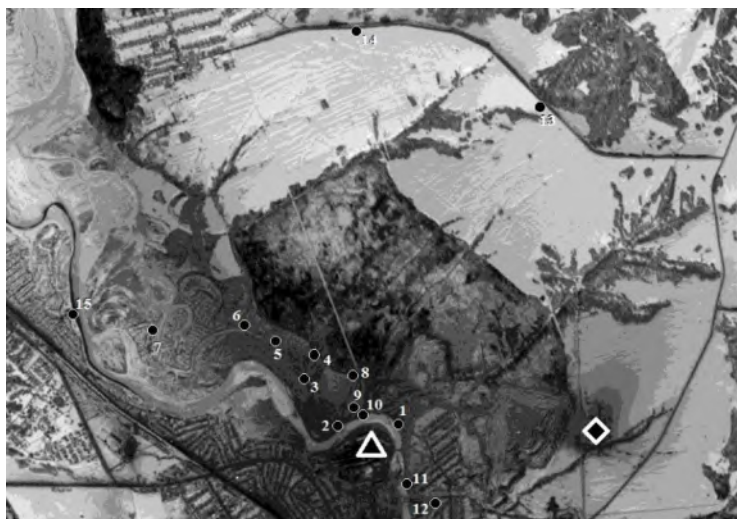


Рис. 6: Схема точек отбора проб на спутниковом снимке окрестностей ОАО "Искитимцемент" от 25 марта 2019 г. с КА Landsat-8. Обозначения: ● – окрестности цементного завода; ▲ – положение высотных труб; ◆ – расположение цеха производства цемента сухим способом

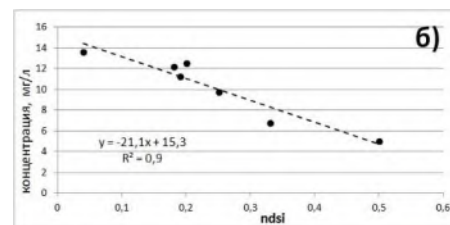
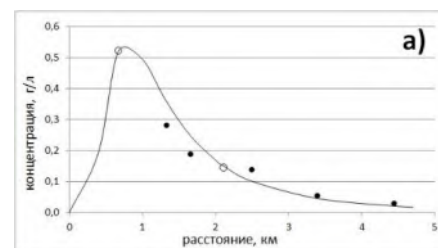


Рис. 7: Измеренные и численно восстановленные концентрации осадка (а); корреляционная зависимость между индексом NDSI и концентрацией водорастворенного кальция (б) в северо-западном направлении от цементного завода

С привлечением моделей реконструкции в приближении легкой и монодисперсной примеси численно восстановлены поля выпадений рассматриваемых примесей от высотных труб завода (рис. 7).

Результаты исследований подтвердили эффект значительного защелачивания окружающих территорий, позволяют проводить взаимный контроль результатов, получаемых с этих систем наблюдений в пределах обследованной территории. Наибольшее воздействие поверхностного загрязнения будет проявляться в период активного снеготаяния. Контактными и дистанционными наблюдениями установлено, что в зимний период основные выпадения загрязняющих примесей происходят вдоль долины р. Бердь, что приводит к снижению качества воды в реке и прилегающих к ней сельхозугодьях.

Для расчета высоты подъема дымового шлейфа использованы соотношения, основанные на "законе 2/3". В условиях нейтральной температурной стратификации атмосферы подъем вычисляется по формуле:

$$h = 1.6 F^{1/3} (3.5 x)^{2/3} u^{-1}, \quad F = g w_s r^2 (1 - T_a / T_c),$$

где $x = 14 F^{5/8}$ для F меньше $55 \text{ м}^4 \text{ с}^{-3}$; $x = 34 F^{2/5}$ для F больше или равно $55 \text{ м}^4 \text{ с}^{-3}$, h – высота подъем выбросов от устья трубы (м); u – средняя скорость ветра в слое распространения примеси (м с^{-1}); F – параметр силы плавучести ($\text{м}^4 \text{ с}^{-3}$); g – ускорение свободного падения (м с^{-2}); w_s – скорость газовой смеси на выходе из трубы (м с^{-1}); r – радиус трубы (м); T_c – температура смеси ($^\circ\text{K}$); T_a – температура окружающего воздуха ($^\circ\text{K}$).

Проведено оценивание дополнительных высот подъема дымовых смесей от высотных труб Ново-Иркутской ТЭЦ и ТЭЦ-3 г. Барнаула. Расчеты выполнены как с использованием представленных формул, выведенных на основе теории размерности, так и на основе спутниковых снимков дымовых шлейфов. В табл. 1 представлены результаты оценивания параметров дымовых выбросов от ТЭЦ-3 г. Барнаула.

Таблица 1: Оценки параметров дымовых шлейфов от высотной трубы ТЭЦ-3 г. Барнаула для 19 ноября и 2 декабря 2018 г.

Дата	Параметр плавучести, м ⁴ /с ³	Расстояние x , м	Расчетное значение h , м	Оценка h по спутниковым снимкам, м
19.11.2018 г.	406	376	405	470
02.12.2018 г.	427	383	300	350

Расчеты, проведенные обоими способами, показали вполне удовлетворительное согласие между оценками высот подъема. Это указывает на возможность эффективного использования спутниковой информации в решении обратных задачах оценивания параметров плавучести, динамических и тепловых характеристик дымовых смесей.

Рассмотрена актуальная задача оценивания длительного загрязнения атмосферы города по данным сетевых наблюдений на примере Новосибирска. Для анализа процессов загрязнения были использованы результаты среднемесячных измерений концентраций бенз(а)пирена (БП) на стационарных постах Росгидромета в 2018 г. Проведено исследование оценки влияния ветрового режима на уровни содержания БП в атмосферном воздухе города. Для определения ветровых характеристик привлекались данные наблюдений на метеорологической станции Огурцово (индекс ВМО 29638), расположенной вблизи Новосибирска. С учетом расположения доминирующих источников проведен анализ связей повторяемостей направлений ветра с измеренными уровнями концентраций БП на постах контроля качества воздуха в городе. Установлены закономерности формирования атмосферных загрязнений от повторяемости штилевых условий в холодный период года. Показано, что в зимние месяцы 2018 г. высоким концентрациям БП, достигавшим 15–20 ПДК, сопутствовало большое количество штилей.

Проведенные исследования показали значимое влияние фактора повторяемости штилей на повышенные концентрации БП в атмосферном воздухе Новосибирска в 2018 г. Особенно явно этот эффект проявился в зимние месяцы. Взаимное расположение пунктов контроля состояния атмосферного воздуха и проходящих вблизи крупных автомагистралей не оказывают решающего влияния на формирование высоких концентраций БП даже при доминирующих ветрах в направлении постов.

Для детального описания полей атмосферного загрязнения территорий города необходимо существенное расширение сети наблюдений. В качестве дополнительных источников информации могут служить мониторинговые исследования многокомпонентного загрязнения природных планшето.

Проекты РФФИ

Проект РФФИ № 20-05-00536 "Исследование роли арктических шельфовых морей в формировании ледовых и гидрологических полей Северного Ледовитого океана в условиях меняющегося климата Земли".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Голубева Е. Н.

Трехмерная численная модель океана и морского льда SibCIOM использовалась для исследования физических механизмов, обеспечивающих взаимодействие шельфовых районов и глубоководных частей Северного Ледовитого океана (СЛО) в условиях изменения климата.

Проведена серия численных экспериментов для анализа пространственно-временной изменчивости процессов, протекающих в водах Северного Ледовитого океана и его шельфовых морях, анализируется их чувствительность к вариациям внешнего воздействия.

Результаты контрольного численного эксперимента, проведенного с использованием данных атмосферного реанализа NCEP/NCAR для формирования потоков на границе атмосфера – океан и атмосфера – лед, отражают реакцию океана на происходящие изменения в атмосфере полярных широт и прилегающих акваторий в период с середины прошлого столетия до 2020 г. Один из наиболее ярких признаков изменчивости состояния Северного Ледовитого океана – сокращение объема морского льда. Раннее освобождение арктических морей ото льда повышает роль ветра в формировании течений в шельфовой области, что способствует переносу пресных вод арктических рек в глубоководную часть бассейна. Проведенное исследование позволяет проследить изменчивость траектории распространения речных вод на основе моделирования переноса трассеров, поступающих в шельфовую зону в районах, соответствующих устьям арктических рек. По результатам численного моделирования прослежены траектории распространения трассеров арктических рек в различные периоды атмосферной циркуляции, определяемые на основе индексов Северо-Атлантического и Арктического колебаний, определено время нахождения речных вод в шельфовой области. По модельным оценкам среднее время нахождения трассеров сибирских рек в акватории моря в современный период (после 2000 г.) сократился примерно в 2 раза по сравнению со второй половиной 20 в. и составляет 3,2 г. для рр. Обь и Енисей и 7 лет для р. Лена.

На основе результатов численного моделирования проанализирована временная изменчивость слоя холодного халоклина – одной из основных характеристик вертикальной структуры вод арктического бассейна. Определена связь с атмосферной циркуляцией и траекторией распространения сибирских рек.

В качестве основного метода выявления наиболее значимых физических механизмов, определяющих изменчивость модельных полей, рассматривалась постановка сценарных численных экспериментов, направленных на исследование чувствительности моделируемых переменных к вариациям внешнего воздействия. Контрольный эксперимент рассматривался в качестве базового, с результатами которого проводилось сравнение при анализе последствий вариаций внешнего воздействия. Анализ опирался на оценку среднемесячных значений рассчитанных характеристик.

Исследовано влияние теплового стока сибирских рек на изменение гидрологических и ледовых полей СЛО в период 2000–2020 гг. Очевидным результатом стал вывод о том, что это влияние наиболее выражено в шельфовых районах, особенно вблизи устьев рек. В глубоководной части Северного Ледовитого океана значение речного тепла в среднем за весь период не превышает 1.5 %. Вместе с тем результаты численных экспериментов демонстрируют увеличение вклада речного тепла в процесс сокращения морского льда в арктическом бассейне в конце второго десятилетия текущего столетия. Наиболее выражен этот процесс в глубоководной части СЛО восточного полушария. В отличие от шельфовых районов, где влияние теплового стока рек на ледяной покров проявляется в весенне-летний период, в глубоководной части бассейна аномалии в толщине льда, обусловленные учетом речного тепла, возникают в осенне-зимний период.

Проанализировано влияние изменчивости расхода и температуры поступающих через Берингов пролив тихоокеанских вод на состояние вод морей Чукотского и Бофорта. Вариации

граничных условий на проливе определялись в соответствии с работами, основанными на анализе данных наблюдений. Модельные расчеты показывают, что повышение в 2003–2015 гг. температуры и расхода тихоокеанских вод, поступающих в Северный Ледовитый океан через Берингов пролив, способствовало увеличению теплосодержания верхнего слоя, а также сокращению площади льда в море Бофорта и Чукотском море.

Проведены численные эксперименты по чувствительности гидрологических и ледовых полей к формированию блокирующих атмосферных процессов в арктических шельфовых морях и прилегающей акватории в течение 5-летнего периода 2016–2020 гг. Показано, что вариации ветрового и термического воздействий над шельфовой областью приводят к изменениям характеристик прилегающей глубоководной части СЛО. Наибольший отклик в модели получен при включении вариаций атмосферного воздействия, приводящих к дополнительному формированию ледяного покрова.

По результатам численного моделирования оценен вклад заприпайной полыньи в процесс формирования ледяного покрова СЛО. Выявлен тренд на повышение доли образованного льда в полынье за период 2000–2020 гг., а также то, что наиболее выраженное влияние на объем образованного льда в полынье оказывает не изменение температуры атмосферы (как понижение, так и повышение), а ее динамическое состояние.

Проект РФФИ № 20-05-00241 "Модельная оценка выделения метана из донных отложений Арктики в атмосферу в прошлом и будущем".

Руководитель проекта – к.ф.-м.н., Малахова В. В.

Оценки вклада океанических источников метана невелики по сравнению с наземными, такими как заболоченные территории. Однако источники CH_4 в Арктике могут играть значимую роль из-за больших объемов метана, которые находятся под морским дном в зоне стабильности газовых гидратов. Особый интерес вызывает существование субаквальной мерзлоты в донных отложениях мелководного арктического шельфа и наблюдаемая в этом регионе интенсивная эмиссия метана. Количественная оценка выхода метана из морского дна и его дальнейшего потока в атмосферу – основные нерешенные вопросы, касающиеся морского цикла метана.

На основе численного моделирования проанализирована эмиссия метана из донных отложений арктических шельфовых морей в воду и атмосферу, вызванная деградацией подводной мерзлоты и метангидратных залежей. При этом использовался комплекс моделей, описывающий пространственно-временную изменчивость процессов, происходящих в атмосфере, ледовом покрове, океане, донных отложениях океана, зоне стабильности поддонных метангидратов и субаквальных мерзлых породах.

Процессы засоления гидратонасыщенных донных отложений способствуют ускорению деградации гидратов и оттаиванию мерзлоты. Используя соотношения для определения зоны стабильности гидрата метана (ЗСМГ) с учетом солености, получены оценки влияния диффузии соли на состояние этой зоны. Учет солености при расчете термобарических условий устойчивости гидрата метана приводит к сокращению ЗСМГ. Однако глубина залегания ее под морским дном более 100 м, что делает это влияние незначительным (менее 5 %).

Проведено исследование процесса диссоциации гидрата метана в донных отложениях шельфа с учетом затрат тепла и гидратонасыщенности пород. Анализ проведенных

экспериментов показал, что эндотермическая реакция является существенным механизмом замедления диссоциации гидратов в мерзлых отложениях. Для мелкого шельфа, затопленного 5000 лет назад, дополнительная задержка отклика может составить 2100–2900 лет в зависимости от гидратонасыщенности залежи. Это подтверждает мнение о том, что текущие изменения теплового состояния подводной мерзлоты связаны с окончанием последнего ледникового цикла, а не с современным потеплением климата в масштабе столетия.

Получены модельные оценки объемов метана в газогидратах донных отложений Северного Ледовитого океана в условиях субаквальной мерзлоты. Примерно 164 Гт С могут быть изолированы в газовых гидратах мелководных шельфов, что составляет около 10 % от современных глобальных оценок (соответствующих от 1600 до 1800 Гт С).

Получена оценка выделения метана из донных отложений арктического шельфа в воду в экспериментах с моделью термодинамических процессов в донных отложениях при учете гидратонасыщенности пород. В последнем тысячелетии как для мелководной, так и для средней части шельфа средняя эмиссия метана составила 2–5 г/м² в год. Полученная оценка находится в диапазоне имеющихся оценок, основанных на данных измерения. Дальнейшее сокращение ЗСМГ в моделировании с учетом внешних выбросов СО₂ привело к увеличению эмиссии метана в течение последующих 2 тыс. лет до 4–16 г/м² в год.

Совместное моделирование состояния водных масс, ледяного покрова и переноса растворенного метана позволило получить пространственную и временную изменчивость эмиссии метана с акватории арктических морей. На основе региональной модели "океан – лед" SibCIOM выполнены расчеты по моделированию состояния водных масс, ледового покрова Северного Ледовитого океана и переноса растворенного метана для периода с 1970 по 2019 гг. Оценки эмиссий метана в атмосферу выполнены на основе различных параметризаций процесса газообмена в системе "вода – атмосфера" и "вода – лед – атмосфера". Получены оценки эмиссии метана в зимний период. Выбросы в этот период связаны с участками открытой воды в ледяном покрове – трещинами и полыньями. Полученная пространственная изменчивость потоков метана в атмосферу в первую очередь связана с особенностями циркуляции и ледовой обстановки. Самые высокие потоки СН₄ получены в осенние месяцы. Это указывает на роль конвективного перемешивания водного столба и увеличения скорости ветра в этот период. Расчетный суммарный поток метана из морей арктического шельфа в атмосферу составил 0,7–2 Тг СН₄/год. Показано, что моря Восточно-Сибирского шельфа вносят наибольший вклад в общую эмиссию метана в регионе. Впервые получена оценка количества метана, который, поступив из донных отложений, достигает атмосферы. В зависимости от рассматриваемого периода эта доля составляет 4–10 %. Более продолжительные периоды открытой воды и снижение сплоченности льда способствуют увеличению количества метана, который может выйти в атмосферу в осенние и зимние месяцы. Это в свою очередь приводит к росту суммарного годового потока.

В условиях продолжающегося и прогнозируемого потепления климата в ближайшие годы рост выбросов метана из арктических морей будет определяться не только потоками газа из дна, но и процессом изменения ледового покрова Арктики. Для исследования влияния будущих изменений климата на термохалинную структуру, состояние льда и эмиссию метана в атмосферу были проведены сценарные расчеты на основе модели океана и морского льда SibCIOM до 2100 г. Атмосферное воздействие было задано по результатам расчетов с моделями ансамбля CMIP5 при

сценарии антропогенного воздействия rcp 8.5 для периода 2006–2100 гг. Были отобраны модели CNRM-CM5, IPSL-CM5B-LR, MPI-ESM-LR, GFDL-CM3, BCC-CSM-1.1, MIROC-ESM-CHEM. В результате получено увеличение суммарного годового потока метана в 2–4 раза к 2100 г. по сравнению с современным периодом в зависимости от сценария. Интенсивность потока при этом не превысила 8 Тг/год. По результатам моделирования будущей рост эмиссии метана может быть напрямую связан с сокращением морского ледяного покрова.

Проекты Министерства образования и науки РФ

Крупный научный проект Министерства образования и науки № 075-15-2020-787 "Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории".

Блок 4. Численный анализ данных мониторинга загрязнения атмосферы

Ответственные исполнители: д.ф.-м.н. Рапута В. Ф., к.ф.-м.н. Леженин А. А.

Разработаны модели оценивания загрязнения атмосферного воздуха на территориях города. В их основе – асимптотические приближения решений уравнения турбулентной диффузии для невесомой примеси в приземном слое атмосферы, поступающей от большого числа мелких источников. С использованием полученных соотношений выполнена интерполяция результатов измерений среднегодовых концентраций бенза(а)пирена в атмосфере Ангарска со стационарных постов Росгидромета и содержания ртути в листьях тополя на территории Иркутска по данным биомониторинговых исследований. Предложены оптимизационные модели оценивания допустимых верхних и нижних значений уровней загрязнения и суммарной эмиссии атмосферных примесей с городских территорий по данным наблюдений. Алгоритмы оценивания мажорантных и минорантных полей концентраций состоят в численной реализации наборов задач линейного программирования, достигающих большой размерности, которая зависит от плотности сети наблюдений и степени детализации описания полей загрязнения городских территорий. Выполнен ряд тестовых расчетов по определению допустимых границ значений концентраций примеси. Полученные результаты ориентированы на развитие эффективных методов и технологий цифрового мониторинга загрязнения окружающей среды с использованием как инструментальных методов контроля состояния атмосферного воздуха, так и методов биомониторинга территорий городов.

Предложены методические подходы к совместному использованию моделей реконструкции, данных наземного и спутникового мониторинга загрязнения снежного покрова в окрестностях промышленных предприятий. Апробация предложенного метода проведена на спутниковых снимках окрестностей Гусиноозерской ГРЭС, Ангарского цементного завода с индексацией полей аэрозольных выпадений взвешенных веществ в значениях NDSI. Полученные результаты относятся к прорывным технологиям наземного и спутникового мониторинга загрязнения окружающей среды, внешнего контроля атмосферных выбросов промпредприятий и могут быть использованы организациями реального сектора экономики при разработке и реализации природоохранных мероприятий.

Выявлены линейные корреляционные связи между результатами измерений концентраций бенза(а)пирена в городах БПТ в 2017–2019 гг. на постах Росгидромета. В целом установлен

высокий уровень согласия как между измерениями на постах в каждом из городов, так и между постами из разных городов. Проведены исследования связей между концентрациями бенз(а)пирена на постах городов БПТ и повторяемостями штилей на метеостанции Хомутово в 2018, 2019 гг. Полученные результаты позволяют выполнять дополнительный контроль достоверности получаемой экспериментальной информации на постах, фиксировать появление новых источников эмиссии.

В зимние месяцы наблюдается чрезвычайно высокий уровень загрязнения атмосферы бенз(а)пиреном в городах БПТ, что обусловлено как большими объемами сжигания органического топлива, так и особенностями климатических условий. В связи с этим актуальной задачей является развитие различных взаимосвязанных систем мониторинга окружающей среды. Для получения более полной картины загрязнения городских территорий предложены методы совместного использования данных наземного и спутникового мониторинга снежного покрова. Оценка состояния загрязнения заснеженных территорий проводится с привлечением моделей реконструкции и различных снеговых индексов, установлением статистических связей межсредового загрязнения атмосферный воздух – снежный покров.

Проведен численный анализ ингаляционных рисков для здоровья населения в городах Прибайкалья. В качестве основы были использованы данные среднемесячных измерений концентраций бенз(а)пирена на постах Росгидромета в городах Ангарске, Усолье-Сибирском, Иркутске и Шелехове, информация с метеостанции Хомутово, статистические зависимости между измеряемыми концентрациями и повторяемостями штилевых условий. Установлено, что величина канцерогенных рисков в зимние и летние периоды значительно различается и может варьироваться в пределах порядка. Наибольшие канцерогенные риски для здоровья населения от загрязнения атмосферного воздуха бенз(а)пиреном имеют место в городах Усолье-Сибирское и Шелехово. В 2018 г. риски для здоровья в городах БПТ были существенно выше, чем в 2017 и 2019 гг., и оказались на грани приемлемых. Причиной явились высокие концентрации бенз(а)пирена, зафиксированные на городских постах и возникшие вследствие аномальных штилевых условий. Результаты проведенных исследований имеют важное значение для решения социально-экономических и экологических проблем страны и, в частности, могут быть использованы для анализа данных мониторинга загрязнения городских территорий и последующего планирования комплекса мероприятий по профилактике заболеваний, обусловленных негативным воздействием техногенных выбросов.

Грант Министерства образования и науки № 075-15-2021-947 в форме субсидии из федерального бюджета на обеспечение проведения научных исследований российскими научными организациями совместно с организациями из стран-членов ЕС в рамках многостороннего сотрудничества в программе "Горизонт-2020" "Климатические взаимодействия и обратные связи: ключевая роль морского льда и снега в полярной и глобальной климатической системе".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Платов Г. А.

Проект нацелен на улучшение понимания того, как быстрое сокращение морского льда взаимосвязано с физическими и химическими изменениями в полярных океанах и атмосфере, на получение количественных оценок природных процессов, контролируемых химические, биогеохимические и физические явления, процессов взаимодействия в связанной системе "океан –

лед/снег – атмосфера" посредством всестороннего анализа новых и появляющихся контактных и удаленных наблюдений. Проект способствует развитию технологических, региональных и климатических моделей ESM, следуя путем улучшения описания: динамики морского льда и энергетических обменов; аэрозолей, облаков и радиации; биогеохимических циклов, обменов парниковыми газами; всей совокупности взаимосвязей внутри системы.

В 2022 г. получены следующие результаты:

1. Проведен анализ климатических изменений последнего столетия, исходя из подготовленных данных и других исследований, применительно к полярным регионам.
2. Проведены численные эксперименты с моделью SibCIOM и анализ их результатов для "исторического" периода, проведен анализ чувствительности климатической системы по отношению к индивидуальным возмущениям циркуляционных мод.
3. Проведен анализ циркуляции арктических морей России и ее изменчивости.
4. Подготовлена модель климатической системы PlaSim-ICMMG для проведения численных экспериментов.
5. Подготовлена и верифицирована на основе данных серия региональных моделей арктических морей SibPOM для проведения численных экспериментов в рамках проекта. Разработана параметризация вихревого переноса массы в океане с использованием результатов SibPOM.
6. Проведен анализ основных тенденций изменения климата Арктики в прошлом столетии и в будущем с использованием результатов имеющихся сценарных расчетов МГЭИК и на основе полученного разложения состояния по модам.
7. Проведена верификация модели климатической системы Земли INM-SibCIOM, построенной на основе модели INMCM и модели океана и льда SibCIOM.
8. Разработаны и реализованы численные методы решения обратных задач для интегрированных оценочных математических моделей экономики и климата на основе систем ОДУ (лаборатория обратных задач естествознания).

Проекты РНФ

Проект РНФ № 20-11-20112 "Разработка системы моделирования для анализа современного состояния и оценки тенденций будущих изменений природной среды Сибирских шельфовых морей".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Голубева Е. Н.

Трехмерное численное моделирование использовано для анализа последствий возможных климатических изменений для морей Сибирского шельфа до конца XXI в. Исследование проводится на основе разработанной в ИВМиМГ СО РАН трехмерной региональной численной модели океана и морского льда SibCIOM (пространственное разрешение в среднем 15 км в Арктике). Для расчета прогностических потоков на поверхности океана и морского льда использовались результаты численных расчетов по моделям климатической системы IPSL-CM6A-LR, ACCESS-ESM 1.5, MPI-ESM1-2HR, GFDL-CM4 и BCC-CSM2-MR. Расчетные поля климатических моделей получены по социально-экономическому сценарию SSP585, считающемуся экстремальным и предполагающему интенсивную эксплуатацию ресурсов ископаемого топлива с высоким процентным содержанием угля и энергоемких технологий.

Анализ используемых полей температуры приземного слоя атмосферы выявил положительный среднегодовой тренд, значения которого для морей Сибирского шельфа варьируются от 0.09 до 0.2 градуса/год в зависимости от региона и выбора климатической модели. В соответствии с проведенным анализом климатические модели можно упорядочить следующим образом: модель IPSL-CM6A-LR, прогнозирующая наибольший тренд, затем ACCESS-ESM 1.5 и три модели GFDL-CM4, BCC-CSM2-MR и MPI-ESM1-2HR, которые показывают наиболее близкие результаты.

Проведена серия прогностических расчетов развития гидрологической и ледовой ситуации на шельфе сибирских морей до конца XXI в. с использованием численной модели океана и морского льда SibCIOM и результатов расчетов состояния атмосферы по моделям климатической системы (2015–2100 гг.).

Анализ изменения среднемесячного объема льда, просуммированного по акватории морей Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского, показывает сокращение льда в Карском море и море Лаптевых начиная с 1930–1940-х гг. Наиболее интенсивно процесс сокращения объема льда происходит с атмосферным форсингом модели IPSL-CM6A-LR. В остальных экспериментах проведенной серии сокращение объема в летний период является менее равномерным. Сравнение с аналогичными значениями, полученными с применением моделей климатической системы, показывает значительные различия в моделируемом объеме льда. Численные результаты показали, что одним из основных механизмов, влияющих на толщину льда в моделях, является поток нисходящей длинноволновой радиации. Его коррекция (изменение в пределах 5–10 %) приводит к существенному изменению объема ледяного покрова арктических морей и темпов его сокращения.

Важным физическим процессом, определяющим состояние ледяного покрова и гидрологических полей морей Сибирского шельфа, является динамическое состояние атмосферы. Результаты численного моделирования показывают, что при выборе атмосферного форсинга с близким положительным трендом повышения температуры атмосферы темпы сокращения прогнозируемого ледяного покрова значительно различаются.

Для анализа тенденций накопления тепла в шельфовых морях до 2100 г. в прогностических экспериментах (SibCIOM) построены аномалии температуры придонного слоя вод для восьми десятилетних периодов относительно периода 2015–2020 гг. Заметное потепление в придонном слое сибирских шельфовых морей начинает происходить после 2030-х гг. для экспериментов с данными IPSL-CM6A-LR и ACCESS-ESM 1.5 и после 2040-х гг. для экспериментов с данными трех других моделей. Область устойчивой положительной аномалии – Карское море и континентальный склон моря Лаптевых, что обусловлено повышением влияния атлантических вод и, предположительно, усилением обмена между Карским морем и морем Лаптевых. Следует отметить, что эти области совпадают с областями наибольшего повышения придонной температуры по результатам климатических моделей. По результатам прогностических экспериментов SibCIOM изменения в придонном слое происходят наиболее медленно в Восточно-Сибирском море.

В результате проведенного исследования установлены закономерности распространения и эволюции подводной мерзлоты на шельфе арктических морей для современного периода. Получено пространственное распределение подводной мерзлоты в донных отложениях Сибирских шельфовых морей для 2014 г. с учетом придонной температуры воды из расчетов с климатическими моделями CanESM5, IPSL-CM6A-LR и ACCESS-ESM1-5. Глубина залегания нижней границы мерзлых пород по результатам расчета для 2014 г. составила порядка 10–700 м. Верхняя

граница мерзлого слоя расположена на глубине 12–50 м ниже морского дна в зависимости от области шельфа.

Получены оценки тенденций состояния подводной мерзлоты в донных отложениях Сибирских шельфовых морей до 2100 г. с учетом климатических изменений в регионе. Изменения температуры придонной воды в период с 2015 по 2100 г. по результатам сценария SSP5-8.5 с климатическими моделями CanESM5, IPSL-CM6A-LR и ACCESS-ESM1-5 приводят к ускорению деградации подводной мерзлоты до 2100 г. Так, средняя скорость сокращения мерзлого слоя для периода 2014–2100 г. увеличилась до 63, 78 и 105 км³/год в расчетах с ACCESS-ESM1-5, IPSL-CM6A-LR и CanESM5 соответственно, что в 2.5 раза больше, чем скорость деградации подводной мерзлоты при историческом сценарии для 1850–2014 гг.

Получены оценки толщины ЗСГМ, связанной с существованием многолетнемерзлых пород. Для мелководного шельфа (глубина воды 10–20 м) модельная толщина ЗСГМ составила около 1000 м. Мощность ЗСГМ на среднем шельфе (глубина воды 30–50 м) достигает 550–700 м. Сокращение ЗСГМ происходит в основном со стороны нижней границы. Этот процесс является прежде всего следствием голоценовой трансгрессии моря, в результате которой и многолетнемерзлые породы, и метангидраты оказались в неравновесных условиях существования. При потеплении в придонном слое воды (до 2100 г.) ЗСГМ начинает сокращаться со стороны верхней границы более быстрыми темпами. Скорость сокращения ЗСГМ составляет от 1 до 4 м в тысячу лет.

Разработаны численные методы решения обратной динамической задачи сеймики для локализации газогидратов и оценки их физических свойств в целях прогнозирования их состояния. Построены две модели: модель для исходного состояния газогидратов; модель для начала их растепления, т. е. уменьшения добротности среды. Выполнена серия численных экспериментов, показавшая приемлемую точность реконструкции скоростей и добротностей и, что представляется чрезвычайно важным, отсутствие связанности этих параметров.

Публикации

Монографии

1. 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. 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. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2022. С. 294–333. ISBN: 978-5-6047889-4-3. DOI: 10.53954/9785604788943.

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Cheverda, V., Bratchikov, D., Gadylyshin, K., Golubeva, E., Malakhova, V., Reshetova, G. Subsea methane hydrates: Origin and monitoring the impacts of global warming // *Appl. Sci.* 2022. V. 12. P. 11929. DOI: 10.3390/app122311929.

2. Gochakov, A. V., Antokhina, O. Yu., Krupchatnikov, V. N., Martynova, Yu. V. Long-term variability of Rossby wave breaking in the subtropical jet stream area // *Russ. Meteorol. and Hydrol.* 2022. V. 47. No. 2. P. 79–88. DOI: 10.3103/S1068373922020017.

3. Kovadlo, P. G., Lezhenin, A. A. Generation of kinetic energy of the pulsating component of the wind speed in the atmospheric boundary layer // Proc. SPIE 12341, 28th Intern. Symp. on Atmosph. and Ocean Optics: Atmosph. Phys. 123415Q (7 December 2022); <https://doi.org/10.1117/12.2644558>.

4. Malakhova, V., Golubeva, E. Model study of the effects of climate change on the methane emissions on the Arctic shelves // Atmosph. 2022. V. 13. P. 274. DOI:10.3390/atmos13020274.

5. Malakhova, V. V., Eliseev, A. V. Estimation of the methane release intensity from the Arctic shelf bottom sediments // Proc. SPIE. 28th Intern. Symp. on Atmosph. and Ocean Optics: Atmosph. Phys. 2022. V. 12341, 123416B. DOI: 10.1117/12.2644854.

6. Martynova, Yu. V., Krupchatnikov, V. N., Gochakov, A. V., Antokhina, O. Yu. Relationship between anomalies of the rate of snow cover formation in Western Siberia and atmospheric dynamics in the Northern Hemisphere in the autumn – winter season // Izvestiya, Atmosph. and Ocean. Phys. 2022. V. 58. No. 1. P. 95–109. DOI: 10.31857/S0002351522010072.

7. Mokhov, I. I., Malakhova, V. V., Arzhanov, M. M. Model estimates of intra- and intersentennial degradation of permafrost on the Yamal Peninsula under warming // Dokl. Earth Sci. 2022. V. 506, iss. 2. P. 782–789. DOI: 10.1134/S1028334X22600426.

8. Zuev, V. V., Savelieva, E., Krupchatnikov, V. N., Borovko, I. V. On the role of extratropical volcanic eruptions in Arctic ozone depletion // Proc. SPIE. 2022. V. 12341. P. 1234171. DOI: 10.1117/12.2643384.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Malakhova, V. V. Numerical modeling of methane hydrates dissociation in the submarine permafrost // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2022. V. 1040. P. 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/1040/1/012022.

2. Iakshina, D. F., Golubeva, E. N. Recent climatic change research in the Chukchi and Beaufort Sea based on numerical simulation // Fund. and Appl. Hydrophys. 2022. T. 15, iss. 2. С. 60–75. DOI: 10.48612/fpg/zkvg-71uu-xk44.

3. Kraineva, M., Golubeva, E. Formation of heat anomalies in the Laptev Sea (2000–2020 years) // Proc. in GeoMedia. 2022. V. 15. DOI 10.48612/fpg/zkvg-71uu-xk44.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Боровко, И. В., Градов, В. С., Крупчатников, В. Н. Численное исследование влияния индекса арктической осцилляции на характеристики атмосферных блокирований // Труды Междунар. конф. и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды "ENVIROMIS-2022", Томск, 12–17 сент. 2022 г. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2022. С. 75–78.

2. Гаврилов, А. В., Малахова, В. В., Деревягин А. Ю., Пижанкова Е. И., Попова А. А. Вклад оледенения среднего неоплейстоцена в формирование мерзлых толщ восточно-сибирского шельфа // Мониторинг в криолитозоне : Сб. докл. 6-й Конф. геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов, Москва, 14–17 июня 2022 г. / под ред. Р. Г. Мотенко. М.: 2022. С. 864–869.

3. Гаврилов, А. В., Малахова, В. В., Пижанкова, Е. И., Попова, А. А. Мощность мерзлых толщ о. Новая Сибирь по данным геотермии и численного моделирования // Мониторинг в криолитозоне : Сб. докл. 6-й Конф. геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых,

инженеров и специалистов, Москва, 14–17 июня 2022 г. / под ред. Р. Г. Мотенко. М.: 2022. С. 869–876.

4. Голубева, Е. Н., Крайнева, М. В. Исследование изменчивости состояния морей Сибирского сектора Арктики в 21 столетии на основе численного моделирования // Труды Междунар. конф. и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды "ENVIROMIS-2022", Томск, 12–17 сент. 2022 г. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2022. С. 78–81.

5. Градов, В. С., Платов, Г. А., Володин, Е. М. Результаты моделирования с помощью новой климатической модели INMCM-SIBCIOM // Труды Междунар. конф. и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды "ENVIROMIS-2022", Томск, 12–17 сент. 2022 г. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2022. С. 72–75.

6. Градова, М. А., Голубева, Е. Н. Численное моделирование влияния тепла арктических рек на состояние морского льда // Труды Междунар. конф. и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды "ENVIROMIS-2022", Томск, 12–17 сент. 2022 г. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2022. С. 66–69.

7. Зуев, В. В., Савельева, Е. С., Крупчатников, В. Н., Боровко, И. В. О роли извержений вне-тропических вулканов в формировании арктических озоновых аномалий // Материалы 28-го Междунар. симп. "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Томск, 4–8 июля 2022 г. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2022. С. Е-2–Е-5. DOI: 10.56820/ОАОРА.2022.99.22.002.

8. Крылова, А. И., Лаптева, Н. А. Модель маршрутизации речного стока в континентальном масштабе с переменной скоростью потока // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 4. С. 102–108. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-4-102-108.

9. Леженин, А. А., Рапуга, В. Ф. Влияние ветрового режима на загрязнение атмосферы г. Новосибирска // Интерэкспо Гео Сибирь. 2022. Т. 4. С. 109–115. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-4-109-115.

10. Леженин, А. А., Рапуга, В. Ф. Оценка характеристик подъема дымовых выбросов ТЭЦ с использованием спутниковой информации // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии : Материалы 4-й Всерос. науч. конф. с междунар. участием, Барнаул, 29 авг. – 3 сент. 2022 г. Т. 3. С. 237–241.

11. Малахова, В. В. Моделирование разложения гидратов метана, сформировавшихся в многолетнемерзлых породах // Материалы 28-го Междунар. симп. "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Томск, 4–8 июля 2022 г. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2022. С. D-191–D-194. DOI: 10.56820/ОАОРА.2022.25.25.001.

12. Малахова, В. В., Голубева, Е. Н. Оценка потоков метана в атмосферу из морей арктического шельфа // Труды Междунар. конф. и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды "ENVIROMIS-2022", Томск, 12–17 сент. 2022 г. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2022. С. 69–72.

13. Михайлюта, С. В., Леженин, А. А. Влияние выбросов автономных источников теплоснабжения на загрязнение атмосферного воздуха // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 4. С. 116–123. DOI 10.33764/2618-981X-2022-4-116-123.

14. Рапута, В. Ф., Коковкин, В. В., Амикишиева, Р. А. Наземный и спутниковый мониторинг загрязнения снежного покрова в окрестностях цементного завода // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35, № 6. С. 495–499. DOI: 10.15372/АОО20220610.

15. Рапута, В. Ф., Леженин, А. А. Модели оценивания параметров дымовых выбросов от высотных труб ТЭЦ по спутниковой информации // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 4. С. 54–61. DOI 10.33764/2618-981X-2022-4-54-61.

16. Рапута, В. Ф., Юсупов, Д. В. Модель оценивания литохимического потока ртути по течению реки / Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии : Материалы 4-й Всерос. науч. конф. с междунар. участием, Барнаул, 29 авг. – 3 сент. 2022 г. Т. 3. Барнаул, 2022. С. 268–273.

17. Боровко, И. В. Моделирование переноса примесей с помощью модели Planet Simulator // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 74. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-95.

18. Голубева, Е. Н., Крайнева, М. В. Численное моделирование состояния вод и морского льда сибирских арктических морей в 21 столетии // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 12. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-0098.

19. Градов, В. С., Платов, Г. А., Володин, Е. М. Моделирование климата Арктики с помощью новой климатической модели INMCM-SibCIOM // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 75–76. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-99.

20. Градова, М. А., Голубева, Е. Н. Новая версия численной модели динамики полярного океана с учетом погруженного морского льда // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 76. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-00.

21. Крайнева, М. В., Платов, Г. А. Оценка влияния океанических процессов на формирование тенденций арктического льда // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 78. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-04.

22. Krupchatnikov, V. N., Gochakov, A. V. Investigation of features eddy momentum and heat fluxes in the region of jet streams SibCIOM // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 78–79. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-05.

23. Крылова, А. И., Лаптева, Н. А. Континентальная модель маршрутизации с переменной скоростью речного стока // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 79. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-06.

24. Леженин, А. А., Рапута, В. Ф. Оценка траекторий подъема дымовых шлейфов от высотных труб ТЭЦ // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 81–82. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-10.

25. Леженин, А. А., Ковадло, П. Г., Коробов, О. А., Шиховцев, А. Ю. Применение модели WRF для уточнения структуры оптической турбулентности // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 81. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-09.

26. Малахова, В. В. Оценка площади распространения подводной мерзлоты и зоны стабильности гидратов метана на Арктическом шельфе // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 82. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-11.

27. Малахова, В. В., Голубева, Е. Н. Влияние изменений климата на эмиссию метана на акватории Арктических морей // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 83. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-12.

28. Платов, Г. А. Использование мезомасштабного моделирования для построения параметризации вихревого переноса в арктических морях // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 85. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-14.

29. Рапуга, В. Ф., Гребенщикова, В. И. Оценка атмосферных выносов тяжелых металлов на оз. Байкал в зимний период времени // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 87. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-17.

30. Рапуга, В. Ф., Леженин, А. А. Оценка атмосферного загрязнения в районе южного Байкала по данным наблюдений дымовых шлейфов ТЭЦ // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 154. DOI:10.24412/cl-35065-2022-1-02-42.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Всероссийская научная конференция "Современные проблемы наук о Земле", Москва, Отделение наук о Земле РАН, 11–15 апреля 2022 г. – 1 доклад (Платов Г. А.).

2. Межрегиональная научно-практическая конференция с международным участием "Актуальные вопросы гигиены в условиях современных вызовов", посвященная 100-летию Госсанэпидслужбы, Новосибирск, 14–15 апреля 2022 г. – 2 пленарных доклада (Леженин А. А., Рапуга В. Ф.).

3. 18-я Международная выставка и научный конгресс "Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2022" на тему "Электронное геопространство на службе общества", Новосибирск, 19–21 мая 2022 г. – 12 докладов (Амикишиева Р. А., Боровко И. В., Градова М. А., Голубева Е. Н., Градов В. С., Крайнева М. В., Крупчатников В. Н., Крылова А. И., Леженин А. А., Малахова В. В., Платов Г. А., Рапуга В. Ф.).

4. 27-й Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Москва, 5–9 июля 2022 г. – 6 докладов (Крупчатников В. Н., Боровко И. В., Малахова В. В., Леженин А. А., Рапуга В. Ф., Амикишиева Р. А.).

5. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2022" (МНЧ-2022), Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. – 13 докладов, из них 1 пленарный (Платов Г. А., Градова М. А., Голубева Е. Н., Малахова В. В., Градов В. С., Леженин А. А., Рапуга В. Ф., Крылова А. И., Крайнева М. В., Боровко И. В.).

6. 4-я Всероссийская научная конференция с международным участием "Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии", Барнаул, 29 августа – 3 сентября 2022 г. – 3 доклада (Крылова А. И., Леженин А. А., Рапуга В. Ф.).

7. Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды "ENVIROMIS-2022", Томск, 12–17 сент. 2022 г. – 5 докладов (Боровко И. В., Градова М. А., Градов В. С., Крупчатников В. Н., Малахова В. В., Голубева Е. Н., Платов Г. А., Крайнева М. В.).

8. 4-я Всероссийская конференция с международным участием "Турбулентность, динамика атмосферы и климата", посвященная памяти акад. А. М. Обухова, Москва, 22–24 ноября 2022 г. – 1 доклад (Крупчатников В. Н., Платов Г. А., Градов В. С., Боровко И. В.).

9. 11-я Международная научно-практическая конференция "Морские исследования и образование: MARESEDU-2022", Москва, 25–29 октября 2022 г. – 1 доклад (Малахова В. В.).

10. 6-я конференция геокриологов России "Мониторинг в криолитозоне", Москва, 14–17 июня 2022 г. – 2 доклада (Малахова В. В.).

11. 24-я Международная научная конференция (школа) по морской геологии, Москва, 11–15 апреля 2022 г. – 1 доклад (Малахова В. В.).

12. 29-я Конференция "Аэрозоли Сибири", Томск, 22 – 25 ноября 2022 г. – 6 докладов (Крылова А. И., Леженин А. А., Малахова В. В., Рапуга В. Ф.).

13. "Ломоносовские чтения 2022", секция "Геология", Москва, 14–22 апреля 2022 г. – 1 доклад (Малахова В. В.).

14. 38-я Международная конференция "Ляпуновские чтения", Иркутск, 5–9 декабря 2022 г. – 3 доклада (Рапуга В. Ф., Леженин А. А., Ярославцева Т. В., Амикишиева Р. А.).

15. 8-я Международная научная конференция-школа молодых ученых "Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах", Москва, 12–14 октября 2022 г. – 2 доклада (Крайнева М. В., Градова М. А. Голубева Е. Н.).

Участие в организации научных мероприятий

1. Платов Г. А.:

– член оргкомитета конференции "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология" в рамках 18-й Международной выставки и научного конгресса "Интерэкспо Гео-Сибирь-2022" на тему "Электронное геопространство на службе общества", Новосибирск, 19–21 мая 2022 г.,

– член программного комитета конференции "Марчуковские научные чтения 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

2. Крупчатников В. Н. – член программного комитета конференции "Марчуковские научные чтения 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

3. Леженин А. А. – член организационного комитета конференции "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология" в рамках 18-й Международной выставки и научного конгресса "Интерэкспо Гео-Сибирь-2022" на тему "Электронное геопространство на службе общества", Новосибирск, 19–21 мая 2022 г.

4. Крайнева М. В. – член организационного комитета конференции "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

Итоговые данные по лаборатории

Монографии – 1

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 8

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 11

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 42

Докладов на конференциях – 59, в том числе 3 пленарных

Участников оргкомитетов конференций – 5

Кадровый состав

- | | | |
|-----------------------|-------------|-----------|
| 1. Платов Г. А. | зав. лаб. | д.ф.-м.н. |
| 2. Амикишиева Р. А. | инженер | |
| 3. Боровко И. В. | с.н.с. | к.ф.-м.н. |
| 4. Голубева Е. Н. | г.н.с. | д.ф.-м.н. |
| 5. Градова М. А. | м.н.с. | |
| 6. Градов В. С. | м.н.с. | |
| 7. Крайнева М. В. | н.с. | |
| 8. Крупчатников В. Н. | г.н.с. | д.ф.-м.н. |
| 9. Крылова А. И. | с.н.с. | к.ф.-м.н. |
| 10. Леженин А. А. | с.н.с. | к.ф.-м.н. |
| 11. Малахова В. В. | с.н.с. | к.ф.-м.н. |
| 12. Рапута В. Ф. | г.н.с. | д.ф.-м.н. |
| 13. Яковенко Г. Т. | программист | |
| 14. Якшина Д. Ф. | н.с. | к.ф.-м.н. |
| 15. Ярославцева Т. В. | инженер | |

Амикишиева Р. А., Градова М. А., Градов В. С., Крайнева М. В. – молодые научные сотрудники.

Педагогическая деятельность

- | | |
|--------------------|---|
| Боровко И. В. | – доцент СГУПС |
| Голубева Е. Н. | – профессор НГУ |
| Крупчатников В. Н. | – профессор НГУ |
| Леженин А. А. | – доцент СИУ (филиал РАНХиГС при Президенте РФ) |
| Платов Г. А. | – доцент НГУ |
| Рапута В. Ф. | – ст. преподаватель НГУ |
| Крылова А. И. | – ст. преподаватель НГУ |
| Ярославцева Т. В. | – доцент ВКИ НГУ |
| Градов В. С. | – ассист. преподавателя НГУ |

Руководство аспирантами

- | | |
|---------------|---|
| Градов В. С. | – 3-й год, НГУ, руководитель Платов Г. А. |
| Градова М. А. | – 3-й год, ИВМиМГ СО РАН, руководитель Голубева Е. Н. |

Руководство студентами

- | | |
|----------------|---|
| Пичахчи К. | – ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В. |
| Войт И. А. | – ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В. |
| Туркова А. С. | – ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В. |
| Ивкина М. А. | – ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В. |
| Новикова В. Д. | – ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В. |
| Роговой М. Ю. | – ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В. |
| Сластин Н. К. | – ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В. |
| Чечера С. А. | – ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В. |

Хаустов М. О. – ВКИ НГУ, руководитель Амикишиева Р. А.

Васильев Н. Д. – ВКИ НГУ, руководитель Амикишиева Р. А.

Ушаков Р. Е. – ВКИ НГУ, руководитель Амикишиева Р. А.

Коробкин А. С. – ВКИ НГУ, руководитель Амикишиева Р. А.

Защита диссертаций

Якшина Д. Ф. "Исследование влияния океанических потоков тепла на состояние морского льда Северного Ледовитого океана на основе численного моделирования", специальность 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы. 29 июня 2022 г. Руководитель Голубева Е. Н.