

Лаборатория математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере

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

Важнейшие достижения

Тенденции климатической системы Арктики в условиях глобального потепления

Д.ф.-м. н. Платов Г. А., д.ф.-м.н. Голубева Е. Н., Крайнева М. В., к.ф.-м.н. Малахова В. В.

Разработан комплекс моделей компонент климатической системы Арктики, использовавшийся для исследования роли климатических тенденций в приземном слое атмосферы в формировании и сокращении объема льда Северного Ледовитого океана в 1979–2010 гг. По результатам численных экспериментов установлено, что наибольшее влияние на процесс сокращения площади и объема морского льда оказывают процессы масштаба атмосферного блокинга. В ходе исследований анализировались временные ряды, полученные в результате ЕОФ декомпозиции вектора состояния приземной атмосферы по данным атмосферного реанализа CORE-2. На основе анализа было установлено, что климатические тенденции в состоянии атмосферы связаны, в первую очередь, с изменениями характеристик сезонного хода (1-я мода, рис. 1), параметров Арктической осцилляции (2-я мода), уменьшением площади океана, покрытой льдом (3-я мода) и тенденциями структуры арктического диполя в поле приземного давления (4-я мода). Количество распресненных вод, концентрирующихся в море Бофорта, в значительной степени определяет отклик океана на атмосферное воздействие. Анализ результатов климатических моделей, полученных по различным сценариям ИРСС антропогенного воздействия на климатическую систему в XXI в., показал высокую вероятность продолжения выявленных тенденций в будущем. Полученные результаты позволяют лучше разобраться в сути климатических тенденций в арктических районах и прилегающих умеренных широтах и определить возможные сценарии будущего развития климатической системы.

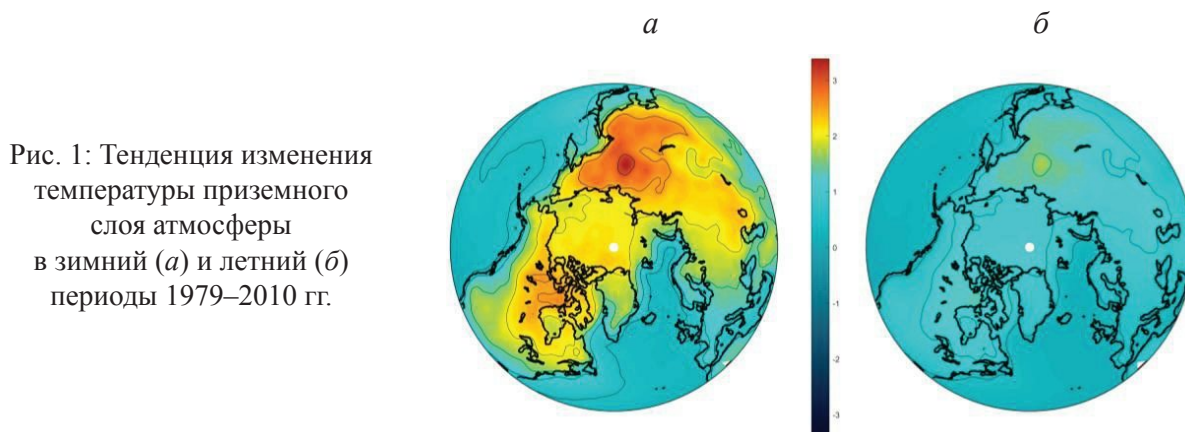


Рис. 1: Тенденция изменения температуры приземного слоя атмосферы в зимний (а) и летний (б) периоды 1979–2010 гг.

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Platov, G.A., Golubeva, E.N., Kraineva, M.V., Malakhova, V. V., Modeling of climate tendencies in Arctic seas based on atmospheric forcing EOF decomposition. [Electron. resource] // Ocean Dynam. 2019. Vol. 69, iss. 6. P. 747–767. DOI: 10.1007/s10236-019-01259-1.

2. Proshutinsky, A., Krishfield, R., Toole, J., Timmermans, M.-L., Williams, W., Zimmerman, S., Yamamoto-Kawai, M., Armitage, T. W. K., Dukhovskoy, D., Golubeva, E., Manucharyan, G. E., Platov, G., Watanabe, E. Analysis of the Beaufort Gyre freshwater content in 2003–2018. [Electron. resource] // J. Geophys. Res. 2019. DOI: 10.1029/2019JC015281.

3. Platov, G., Krupchatnikov, V., Borovko, I. The study of feedbacks of the Arctic climate system in the formation of climate trends [Electron. resource] // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 386. DOI: 10.1088/1755-1315/386/1/012004.

Результаты исследований представлены на конференциях:

1. Liège Colloquium on Ocean Dynamics, Liège (Belgium), May 6–9, 2019. University of Liège.
2. Международная конференция "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики 2019" (АПВММ-19), Новосибирск, 1–5 июля 2019 г.

Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершнным в 2019 г. в соответствии с планом НИР института

Проект НИР "Развитие методов математического моделирования для задач физики атмосферы, гидросферы и окружающей среды с учетом природных и техногенных воздействий".

Номер государственной регистрации НИР 0315-2019-0004.

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

Раздел 1. Руководитель – д.ф.-м.н. Платов Г.А.

Этап 2019 г.

Разработана усовершенствованная версия численной модели океана на основе учета меняющейся по времени высоты уровневой поверхности океана в нелинейной постановке.

Проведено тестирование параметризаций выброса солевого рассола при формировании морского льда в численной модели Северного Ледовитого океана. Включение параметризации выброса соли на границу перемешанного слоя океана, разработанной на основе анализа данных наблюдений, способствует формированию устойчивой стратификации вод и сокращению глубины перемешанного слоя в зимний период до 10–15 м, а также прекращению конвективного перемешивания начиная с марта. Результаты, полученные с помощью крупномасштабной модели океана и морского льда, более точно отражают реальное распределение гидрологических характеристик Арктического бассейна.

Результаты численных экспериментов, проведенных на основе разработанной численной модели океана и морского льда SibCIOM, подтвердили гипотезу о важной роли изменчивости атмосферной циркуляции в переносе пресных вод арктических рек в Северном Ледовитом океане. Увеличение расхода сибирских рек – известное по данным наблюдений явление последних десятилетий. Чувствительность состояния гидрологических характеристик Северного Ледовитого океана к увеличению стока арктических рек проанализирована на основе численного эксперимента, в котором был увеличен расход сибирских рек Лены, Енисея и Оби в полтора раза. Расчеты проводились в модельный период с 2000 по 2014 г. Результаты эксперимента показали, что термохалинные характеристики сибирских морей по-разному реагируют на поступление дополнительной пресной воды. Их аномалии в Карском море значительно отличаются от аномалий в море Лаптевых и Восточно-Сибирском.

За пределами арктического шельфа регионы Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана наиболее чувствительны к увеличению стока сибирских рек. Установившаяся в этот период преимущественно антициклоническая циркуляция океана, обусловленная соответствующим состоянием атмосферной динамики, способствовала переносу избытка пресной воды в направлении пролива Фрама. Температурные аномалии различной интенсивности были обнаружены не только в поверхностном слое, но и в слое атлантических вод,

Рис. 2: Регионы осреднения в Евразийском бассейне для анализа аномалий температуры и солёности в эксперименте с увеличением стока сибирских рек (а); аномалии солёности (psu), осредненные по соответствующей области и в 25-метровом слое (б); аномалии температуры (°C), осредненные по соответствующему региону на глубине 200 м (в); цвет линии соответствует области осреднения

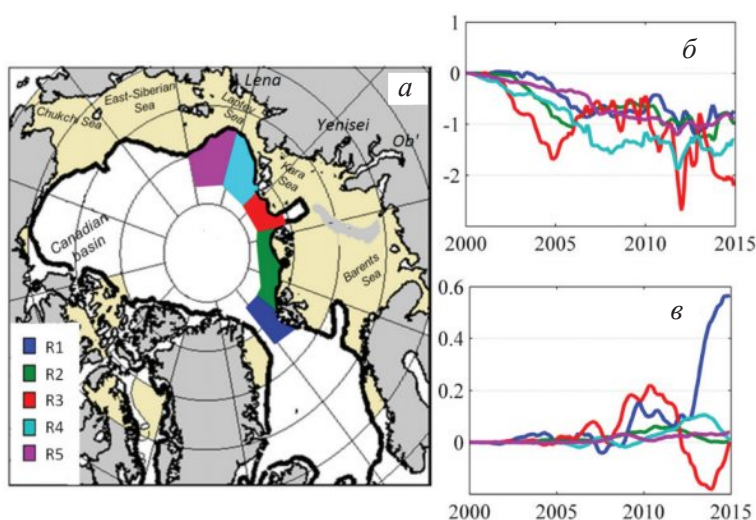
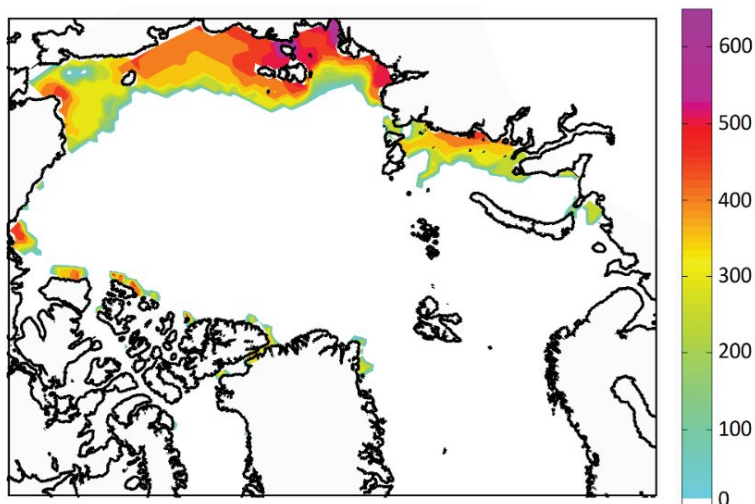


Рис. 3: Результаты моделирования эволюции субаквальной мерзлоты на шельфе арктических морей. Мощность мерзлых пород в донных отложениях (м)



поступающих в Северный Ледовитый океан через пролив Фрама (рис. 2). Небольшие положительные аномалии температуры также обнаружены в Тихоокеанском водном слое в канадском бассейне. Предположительно, воды р. Лены, распространившиеся через Восточно-Сибирское море, а затем на шельф Чукотского моря, повлияли на процессы перемешивания шельфовых вод Чукотского моря, в дальнейшем распространяющихся в Канадский бассейн.

Для исследования процессов формирования субаквальной мерзлоты на шельфе арктических морей разработана модель динамики многолетнемерзлых пород в геологическом разрезе 1500 м за последние 400 тыс. лет в области шельфа с водными глубинами менее 120 м. Получены оценки мощности многолетнемерзлых пород шельфа с учетом данных интенсивности теплового потока. Согласно проведенным расчетам, толщина мерзлого слоя в донных отложениях шельфа составляет от 0 до 700 м и зависит от глубины моря, геотермического потока, засоления донных отложений. Сильная зависимость продолжительности периодов затопления или осушения шельфа от его современной глубины определяет формирование мерзлого слоя различной мощности: с ростом глубины шельфа увеличивается продолжительность периодов трансгрессии и соответствующих периодов деградации субаквальной мерзлоты (рис. 3).

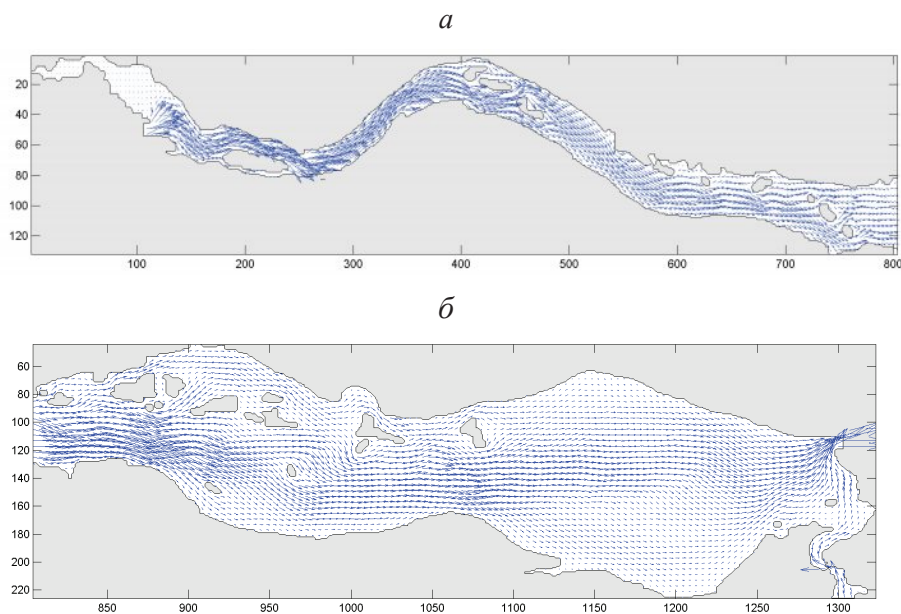


Рис. 4: Поле течений в поверхностном слое (2 м) в зимний период:
a – речная часть; *б* – озерная часть

Разработана трехмерная численная модель мелкого водоема на основе гидродинамической модели SibCIOM. Для взаимодействия термодинамического блока с атмосферой использована ледотермическая модель, основанная на балансе тепловых потоков атмосфера – лед – вода. Поток из атмосферы рассчитывается как сумма потоков явного и скрытого тепла и коротковолновой и длинноволновой радиации.

С целью учета сезонных колебаний уровня воды построена модель свободной поверхности, для полноценной работы которой проведена необходимая на данный момент коррекция батиметрии объекта, заключающаяся в заглаблении мелководий и занижении географических высот в начале водохранилища.

Для термического блока дополнительно использовались среднесуточные значения облачности, удельной влажности, упругости водяного пара, температуры атмосферы и температуры воды, поступающей из рек Обь и Бердь.

Полученные результаты сравнивались с описанием многолетних наблюдений характеристик Новосибирского водохранилища. Сравнение показало, что даже упрощенный вариант модели дает возможность отследить ряд характеристик Новосибирского водохранилища, таких как основные направления течений и средние значения температуры (рис. 4). Следует отметить сильную взаимосвязь между гидродинамическим режимом и распределением температуры.

Предложена модель оценивания подъема газозвушной смеси от источника под воздействием динамических и тепловых факторов с использованием решений уравнений гидротермодинамики атмосферы. Применение аналитического представления решений системы уравнений движения и притока тепла для нейтрально стратифицированной атмосферы позволило получить оценки параметров модели в явном виде. Проведен численный анализ активной фазы подъема дымовых шлейфов ТЭЦ г. Новосибирска на основе зимнего спутникового снимка. Получены соотношения для расчета вертикальной скорости подъема и изменения температуры дымовой струи в нижней атмосфере.

Применение предлагаемого подхода наиболее эффективно в зимний период. Благодаря снежному покрову на спутниковых снимках обеспечивается цветовая однородность



Рис. 5: Сравнение расчетного гидрографа и данных измерений (голубая линия – расчетные гидрографы, красная – климатические наблюдения; ось x – месяц; ось y – $\text{км}^3/\text{мес.}$)

земной поверхности. При таких условиях наблюдается наиболее высокая контрастность тени шлейфов на поверхности. Использование спутниковых наблюдений позволяет получить объективную оценку высоты подъема дымового факела. Для развития методов оценивания характеристик подъема дымовых шлейфов при устойчивой и неустойчивой стратификациях атмосферы требуется численное решение уравнений гидротермодинамики атмосферы.

Для исследования возможности воспроизводить гидрографы стока с бассейна р. Лены построена гидрологически корректная цифровая модель рельефа бассейна разрешением $(1.3) \times (1/3)^\circ$. Для трансформации поверхностного стока с учетом времени добегания воды по ячейки сетки в речную сеть используется линейная двухпараметрическая резервуарная модель. Моделирование стока в речной сети проводится на основе линейной модели формирования водного баланса.

В ходе исследования использована глобальная база данных реанализа MERRA. Для оценки модельного воспроизведения речного стока были проведены расчеты за период 1980–2011 гг., для которого имелись данные наблюдений за речным стоком в замыкающем створе Кюсюр р. Лены. За весь период наблюдений модельные гидрографы неплохо согласуются с данными, повторяя годовой режим речного стока с высоким весенним половодьем, наблюдаемым ежегодно в бассейне р. Лены в июне. На рис. 5 приведены результаты моделирования за несколько лет из указанного периода.

Результаты работ по проекту РНФ

Проект РНФ № 19-17-00154 «Исследование взаимодействия компонент системы "атмосфера – океан – морской лед" арктического региона в условиях изменений глобального климата».

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

В соответствии с планами в первый год выполнения проекта предполагалось: 1) подготовить обзорный анализ публикаций по исследованию механизмов формирования крупномасштабных опасных погодных явлений в Арктическом регионе и средних широтах северного полушария с учетом роли океана; 2) усовершенствовать климатическую модель промежуточной сложности PlaSim-ICMGG-1.0 путем учета углеродного цикла и параметризации обмена CO_2 между атмосферой и океаном; 3) исследовать равновесную реакцию атмосферы и океана на увеличение CO_2 в атмосфере; 4) подготовить и протестировать модели окраинных морей Арктики.

Кроме того, одной из задач проекта является 5) исследование причин сокращения площади и объема морского льда Арктики, выяснение роли изменений адвективных и конвективных потоков тепла в атмосфере и океане, потоков пресной воды, а также внутренних

обратных связей, обусловленных чувствительностью арктической системы "атмосфера – океан – лед" к фазовым изменениям льда и снежного покрова.

1. Обзорный анализ работ по исследованию механизмов формирования крупномасштабных опасных погодных явлений в Арктическом регионе и средних широтах северного полушария с учетом роли океана преследовал несколько целей, наиболее важными из которых для проекта являются: а) формирование понимания круга проблем, возникающих в ходе решения задачи прогноза, предупреждения, оценки рисков экстремальных погодных явлений, связанных с климатическими изменениями; б) выработка плана оценочных и сценарных численных экспериментов с климатической моделью промежуточной сложности, способствующих решению части этих проблем; в) формирование фрагментов обзорной части планируемых к публикации статей. Сформированный таким образом обзор содержит следующие разделы:

- Арктическое усиление,
- Динамические механизмы, связывающие арктическое усиление с динамикой погоды,
- Взаимодействие между тропосферой и стратосферой,
- Долгоживущие погодные режимы в средних широтах и экстремальные климатические явления. Атмосферный блокинг,
- Морские волны тепла,
- Влияние потоков тепла, поступающих с океаническими водами на арктический морской лед.

2. Современные исследования глобального бюджета CO_2 указывают на недооценку изменчивости CO_2 океаническими моделями во внетропических зонах. Также выявлена сезонная изменчивость концентрации CO_2 в поверхностных водах океанов на различных широтах. Это необходимо учитывать при проведении расчетов по оценке роли реакции океанов на изменение CO_2 . Известно, что с увеличением температуры растворимость CO_2 в воде уменьшается. Поэтому при повышении средней глобальной температуры поверхности Земли снижается способность океана поглощать углекислый газ. Это может привести к дальнейшему повышению температуры (положительная обратная связь). Исходя из этого очевидно, что точность воспроизведения концентрации CO_2 в климатических моделях играет большую роль в точности предсказания изменений климата. Для вычисления потока углекислого газа из океана в атмосферу применяется параметризация, использующая концентрацию CO_2 в узлах пространственной сетки модели в воде и атмосфере, и коэффициент обмена.

Для достоверного описания содержания CO_2 в климатической модели проводится подключение модели GOTM/FABM (ранее FABM, ныне включена в пакет турбулентных моделей GOTM). Модель FABM представляет собой открытый исходный код на Fortran и представляет согласованный набор интерфейсов программирования. Она была представлена в 2014 г. (Bruggeman and Bolding, 2014) в качестве промежуточного слоя между биогеохимическими моделями и трехмерными моделями геофизической среды. Общая структура биогеохимической модели с переменными состояниями, выраженными в виде усредненных по ансамблю концентраций, определяется системой уравнений диффузии-адвекции.

На данном этапе выполнено подключение данной модели в виде библиотеки к тестовой версии модели SibCIOM и создаются интерфейсные процедуры обмена данными между гидрофизической составляющей и биогеохимическим блоком. После настройки параметров планируется проведение численных экспериментов по воспроизведению трехмерных полей концентрации CO_2 .

3. Механизмы обратных связей, формирующихся в результате изменения климата, так или иначе связаны с Арктикой и до сих пор плохо изучены. Наиболее существенные последствия связаны с изменениями в криосфере, в частности с уменьшением площади и объема плавучего льда. В ходе проведенных исследований оценивалась роль океана в формировании климатических тенденций, связанных с увеличением концентрации парниковых газов, на примере CO_2 независимо от того, является ли океан сдерживающим фактором или, наоборот, усиливает атмосферные тренды.

Суммируя результаты проведенных численных экспериментов, можно констатировать, что роль океана в реакции климатической системы на увеличение концентрации CO_2 в атмосфере в первом приближении такова:

- океан в некоторой степени (до 20 %) способствует увеличению среднегодового состояния сезонного цикла и уменьшению амплитуды сезонных колебаний (на 2–3 %), что приводит к незначительным изменениям в летний период и значительному смягчению зим;

- океан способствует стабилизации среднегодового уровня индекса арктических колебаний при увеличении концентрации CO_2 , в то же время благодаря ему значительно увеличивается амплитуда сезонного цикла этого колебания;

- океан усиливает как температурную (тепловую) составляющую сезонных колебаний, связанных с появлением дополнительных площадей, освобожденных от ледяного покрова, вызывая дополнительный рост температуры атмосферы у кромки льда, так и сезонные колебания этого компонента, так что летние проявления становятся более сильными;

- роль арктического диполя во время глобального потепления по результатам исследований оказалась незначительной, хотя существуют свидетельства того, что этот режим нельзя игнорировать, так как благодаря ему экспорт арктического льда в сторону северной Атлантики может усиливаться или ослабевать.

4. Для проведения дальнейших численных сценарных экспериментов подготовлена серия моделей окраинных морей Арктики, включающая Баренцево и Карское моря, море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское моря. Выполнена серия тестовых расчетов. Основой проведения экспериментов является ранее разработанная система взаимодействия крупномасштабной модели океана и морского льда SibCIOM и модели шельфового моря SibPOM.

5. В исследованиях последних лет все чаще подчеркивается важность влияния океанического тепла на состояние арктического ледового покрова. Теплые воды Атлантического океана, поступающие через пролив Фрама и Баренцево море, и Тихого океана, поступающие через Берингов пролив, рассматриваются как основные источники тепла для Арктического бассейна. Аномалии температуры, продолжительное время существующие на обширных акваториях этих океанов (океанические тепловые волны), являясь источником тепла, способствуют таянию морского льда.

В целях исследования вклада океана в процесс сокращения арктического льда проанализированы результаты численного эксперимента совместной модели океана и льда SibCIOM для Северной Атлантики и Арктики, моделирующие пространственно-временную изменчивость гидрофизических и ледовых полей в период с 1997 по 2015 гг.

В целях исследования вклада океана в процесс сокращения арктического льда оценены потоки тепла на границах океан – лед и атмосфера – лед и рассчитан вклад тех и других в изменчивость ледового покрова с помощью коэффициентов линейной корреляции.

Полученные значения показывают, что корреляция между объемом льда и потоком океан – лед наиболее высока в регионах начальной траектории распространения Атлантических вод. Тем не менее, корреляция объема льда с потоком атмосфера – лед в регионах пролива

Фрама и Баренцевом море также высока. Не исключено, что это обусловлено взаимным влиянием потоков из атмосферы и океана в регионах с низкой концентрацией льда. В регионах Баренцева моря и территориями пролива Фрама велика взаимосвязь между океаном и атмосферой (0,783 и 0,645 соответственно), что закономерно при большой площади круглогодично открытой воды, поэтому прямое влияние океана здесь оценить сложнее.

Результаты работ по проектам РФФИ

Проект РФФИ № 17-05-00382-а "Анализ прошлых и прогноз возможных изменений циркуляции Арктических морей России в условиях глобального потепления".

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

Целью проведенных исследований является определение особенностей термодинамического состояния и циркуляции окраинных арктических морей России, выявление основных тенденций в условиях последних климатических изменений и прогноз возможного развития в течение ближайшего столетия. В ходе исполнения проекта

1. Проведен анализ тенденций атмосферного воздействия на систему "океан – лед" Арктики и арктических морей, выявлены возможные механизмы сокращения льда в Арктике;

2. Определены основные режимы циркуляции Северного Ледовитого океана и прогнозируемые тенденции ее развития;

3. Детализирован ряд климатических изменений в окраинных арктических морях России;

4. Выявлена связь климатических тенденций с темпами деградации вечной мерзлоты.

Проект РФФИ № 17-05-00396-а "Отклик газогидратов донных отложений океана на естественные и антропогенные изменения климата".

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

Основная цель проекта – проведение комплексного анализа вклада различных процессов, влияющих на термодинамическую устойчивость газогидратов донных отложений и усиление потоков метана в придонный слой воды и атмосферу в условиях настоящих и будущих климатических изменений. Выделены два вида газовых гидратов: 1) глубоководные метангидраты СЛЮ, которые формируются при благоприятных термобарических условиях начиная с морских глубин 250 м; 2) метангидраты, которые могут существовать в условиях многолетнемерзлых пород (ММП) арктических шельфов при глубине воды менее 120 м.

Изучены основные факторы и механизмы, определяющие формирование, динамику и термическое состояние субаквальной мерзлоты и толщины зоны стабильности метангидратов (ЗСМГ) арктического шельфа с учетом данных интенсивности теплового потока и солености поровых вод. Выполнена оценка ЗСМГ и ее чувствительности к климатическим изменениям за прошедшие несколько десятилетий. Для оценки пространственно-временной изменчивости температуры дна океана используется региональная модель "океан – лед" SibCIOM. По результатам проведенных расчетов метангидраты, присутствующие на морских глубинах 250–500 м, наиболее подвержены тепловому воздействию. Газогидраты мелководных шельфов (до 120 м), существующие в условиях субаквальных многолетнемерзлых толщ, реагируют на изменения температуры придонной воды более медленно. Смещение верхней границы ЗСМГ за период с 1948 до 2015 г. составило не более шести метров за счет изменения температуры в толще донных пород и их засоления. Газогидратный слой остается изолированным от поверхности морского дна слоем мерзлого грунта.

Получены оценки чувствительности результатов моделирования термического состояния донных отложений к неопределенности палеоклиматических реконструкций температуры воздуха и уровня океана. Модель дополнена сценариями изменения климата на арктическом шельфе за последние 400 тыс. лет с использованием различных комбинаций реконструкций температуры воздуха и уровня моря. Несмотря на заметные различия между используемыми наборами данных, коэффициент неопределенности отклика мощности многолетнемерзлого слоя и ЗСМГ составил менее 0.3 за исключением изолированных интервалов времени и наиболее глубоких областей шельфа.

Проведено исследование возможного увеличения выброса метана из донных отложений морского дна в СЛО. Получены количественные оценки и пространственное распределение потоков метана из морей арктического шельфа в атмосферу. Суммарный поток метана из морей Арктики по модельным оценкам составил 0.5–1.6 Тг в год. Показано, что моря восточного сектора Арктики вносят наибольший вклад в общую эмиссию CH_4 . При этом эмиссия метана в атмосферу увеличивается как результат сокращения площади льда в шельфовых морях, а также обусловлена особенностями их циркуляции.

Проект РФФИ № 19-47-540008 "Численное и геоинформационное моделирование в задачах мониторинга загрязнения окружающей среды Новосибирской области".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Рапута В. Ф.

Разработаны модели и алгоритмы численного восстановления полей длительного атмосферного загрязнения городских территорий по данным сетевых наблюдений. На их основе выполнены оценки минимально и максимально допустимых концентраций легких примесей по городской территории. Разработана двухпараметрическая модель оценивания эмиссии примеси на значительных удалениях от источника. Апробация модели проведена на данных самолетного зондирования загрязнения диоксидом серы летней атмосферы Норильского промышленного района.

Проведен численный анализ высот подъема дымовых шлейфов от крупных ТЭЦ г. Новосибирска. Для этой цели привлекались данные метеорологической и аэрологической станций и информация со спутников. В качестве базовых соотношений использовались уравнения гидротермодинамики атмосферы. Приведены оценки высоты подъема дымовых струй от труб ТЭЦ для зимних условий.

На данных мониторинга загрязнения снежного покрова в окрестностях Новосибирской ТЭЦ-5 и Чернореченского цементного завода выполнена численная реконструкция полей концентраций пыли, химических элементов, компонентов ионного состава. Созданы базы данных по результатам полевых и химико-аналитических исследований многокомпонентного загрязнения снежного покрова в окрестностях этих предприятий.

**Результаты работ по научно-исследовательским программам,
проектам Президиума РАН, ОМН РАН и Сибирского отделения РАН**

Программа Президиума РАН № 20 "Новые вызовы климатической системы Земли".

Подпрограмма 20.3 "Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования".

Подпроект № 0315-2018-0016 "Анализ возможных последствий климатозоологических изменений на территории Сибири и на шельфе восточной Арктики по результатам численного моделирования климатической системы".

Руководитель – д.ф.-м.н. Платов Г. А.

Цель проекта – оценка последствий климатоэкологических изменений применительно к региону Сибири и Арктического побережья восточной России.

Задачи, решенные в отчетный период:

– Создание, верификация и развитие модели климатической системы Земли промежуточной сложности для исследования вопросов формирования климата Арктики и средних широт, межгодовой и долгопериодной изменчивости характеристик в системе взаимодействия Мирового океана с атмосферой и льдом, особенностей формирования растительного покрова и гидрологического режима суши, оценки влияния антропогенного фактора на формирование климатоэкологических изменений;

– Проведение ряда предварительных сценарных экспериментов для оценки рисков и численного анализа последствий существующего и возможного промышленного освоения северных территорий Сибири и Арктического шельфа;

– Создание на основе постановок обратных задач малопараметрических моделей реконструкции полей регионального загрязнения и оценивания параметров источников выбросов примесей.

В ходе реализации проекта проведен тестовый расчет параметров климатической системы на интервале 100 лет. Начальное состояние атмосферы было получено в предыдущих экспериментах с использованием полной версии автономной модели PlaSim. Распределения температуры поверхности океана в марте и сентябре, полученные в результате усреднения за последние десять лет эксперимента, в целом хорошо согласуются с известными климатическими распределениями. Течения в верхнем 100-метровом слое соответствуют состоянию сильного циклонического режима циркуляции. В результате недостаточной конвергенции экмановского потока в этом регионе ледяное поле оказалось более рассеянным, чем реальное распределение. Перенос тепла от экватора к полюсам несколько завышен в Северном полушарии и недооценен в южном.

В ходе исследования с помощью модели SibCIOM, совместной региональной модели океана и льда Северной Атлантики и Северного Ледовитого океана, численно оценен вклад со стороны океана в сокращение ледового покрова и выполнено сравнение его с вкладом со стороны атмосферы. Результаты исследования показали, что океан оказывает сильное влияние на состояние ледового покрова в регионах Баренцева моря, пролива Фрама и склона Евразийского шельфа. Эти регионы соответствуют начальной траектории распространения атлантических вод в Арктике.

При сравнении результатов с применением активного и пассивного блоков океана и льда выяснилось, что в краткосрочной перспективе (10–15 лет) океан и лед будут способствовать усилению основных атмосферных тенденций, связанных с увеличением концентрации парниковых газов. Однако для получения более полной картины необходимо учитывать поглощение углекислого газа океаном и его усвоение в результате биогеохимических трансформаций.

Разработаны модели для оценки средних и максимальных концентраций химически активных примесей в поперечных сечениях шлейфов и их выноса от удаленного стационарного источника. Апробация моделей проведена на данных самолетного зондирования многокомпонентного загрязнения зимней атмосферы Норильского промышленного района. Численно исследован процесс активного перехода газ – частица, наблюдаемый на удалении 50–100 км от источника выбросов.

Выполнена адаптация разработанных ранее моделей (региональных атмосферных и океанских моделей, моделей распространения примеси и реконструкции полей загрязнения,

модели термофизических процессов в донных отложениях океана) для обеспечения их взаимодействия с климатической моделью. Построена модель речного водосбора.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Arzhanov, M. M., Malakhova, V. V., Mokhov, I. I. The effect of ice sheets on the thermal state of the permafrost and the methane hydrates // Proc. SPIE, 25th Intern. symp. on atmospheric and ocean optics: Atmospheric physics, Novosibirsk, December 18, 2019. Vol. 11208. P. 112087E. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2540599>.

2. Borovko, I. V., Zuev, V. V., Krupchatnikov, V. N. Reaction of the stratospheric polar vortex on the eruption of tropical volcanoes // Proc. SPIE, 25th Intern. symp. on atmospheric and ocean optics: Atmospheric physics, Novosibirsk, December 18, 2019. Vol. 11208. 112089L. DOI: 10.1117/12.2540956.

3. Lezhenin, A. A., Raputa, V. F., Yaroslavtseva, T. V. Use of satellite information for definitions of characteristics of the atmosphere and parameters of sources of emissions // Proc. SPIE, 25th Intern. symp. on atmospheric and ocean optics: Atmospheric physics, Novosibirsk, December 18, 2019. Vol. 11208. 1120876. DOI: 10.1117/12.2540411.

4. Raputa, V. F., Kokovkin, V. V., Shuvaeva, O. V. Aerosol impurities sedimentation monitoring in the vicinity of Novosibirsk electrode making plant // Proc. SPIE, 25th Intern. symp. on atmospheric and ocean optics: Atmospheric physics, Novosibirsk, December 18, 2019. Vol. 11208. 1120842. <https://doi.org/10.1117/12.2540393>.

5. Malakhova, V. V., Eliseev, A. V. Influence of the uncertainty of the sea level data for the Pleistocene glacial cycles on the analysis of the subsea sediments thermal state // Proc. SPIE, 25th Intern. symp. on atmospheric and ocean optics: Atmospheric physics, Novosibirsk, December 18, 2019. Vol. 11208. 112086Q. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2539017>.

6. Platov, G. A., Golubeva, E. N., Kraineva, M. V., Malakhova, V. V. Modeling of climate tendencies in Arctic seas based on atmospheric forcing EOF decomposition // Ocean Dynamics. 2019. V. 69(6). P. 747–767. DOI: 10.1007/s10236-019-01259-1.

7. Proshutinsky, A., Krishfield, R., Toole, J. M., Timmermans, M. L., Williams, W., Zimmermann, S., Yamamoto Kawai, M., Armitage, T. W. K., Dukhovskoy, D., Golubeva, E., Manucharayan, G. E., Platov, G., Watanabe, E., Kikuchi, T., Nishino, S., Itoh, M., Kang, S. H., Cho, K. H., Tateyama K., Zhao, J. Analysis of the Beaufort Gyre freshwater content in 2003–2018 // J. Geophys. Res. Oceans. 2019. <https://doi.org/10.1029/2019JC015281>.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Arzhanov, M. M., Malakhova, V. V., Mokhov, I. I., Parfenova, M. R. Stability of relic methane hydrates at climatic changes in the Holocene // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2019. V. 386. 012019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/386/1/012019>.

2. Golubeva, E., Platov, G., Iakshina, D., Kraineva, M. The simulated distribution of the Siberian river runoff in the Arctic Ocean // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2019. V. 386. 012022. doi:10.1088/1755-1315/386/1/012022.

3. Platov, G., Krupchatnikov, V., Borovko, I. The study of feedbacks of the Arctic climate system in the formation of climate trends // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2019. V. 386. 012004. DOI: 10.1088/1755-1315/386/1/012004.

4. Платов, Г. А., Голубева, Е. Н. Взаимодействие плотных шельфовых вод Баренцева и Карского морей с вихревыми структурами // Морской гидрофиз. журн. 2019. Т. 35, № 6. С. 549–571. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-6-549-571.

5. Raputa, V. F., Simonenkov, D. V., Belan, B. D., Yaroslavtseva, T. V. Estimation of SO₂ emission into the air of the Norilsk industrial region // *Atmosph. and Ocean. Opt.* 2019. V. 32. No. 06. P. 650–654. DOI: 10.1134/S1024856019060125.

6. Lezhenin, A.A., Raputa, V.F., Yaroslavtseva, T.V. Use of satellite information in the study of processes of pollution transport in the boundary layer of the atmosphere // (2019) CEUR Workshop proc., 2534. P. 389–394.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Алексеева, М. Н., Рапута, В. Ф., Ярославцева, Т. В., Яценко, И. Г. Оценка атмосферного загрязнения при сжигании попутного газа по данным дистанционных наблюдений теплового излучения // *Оптика атмосферы и океана.* 2019. Т. 32, № 11 (370). С. 915–919. DOI: 10.15372/AOO20191106.

2. Аржанов, М. М., Малахова, В. В., Мохов, И. И., Парфенова, М. Р. Устойчивость реликтовых метангидратов при климатических изменениях в голоцене // *Сб. трудов Междунар. молодежной школы и конф. по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде "CITES-2019"*, Москва, 27 мая – 6 июня 2019 г. С. 128–131.

3. Платов, Г. А., Голубева, Е. Н. Исследование роли атмосферного форсинга при формировании ледового поля Арктики // *Сб. трудов Междунар. молодежной школы и конф. по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде "CITES-2019"*, Москва, 27 мая – 6 июня 2019 г. С. 35–39.

4. Платов, Г. А., Голубева, Е. Н., Карачакова, А. Р. Исследование процессов каскадинга на шельфе Карского моря // *Сб. трудов Междунар. молодежной школы и конф. по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде "CITES-2019"*, Москва, 27 мая – 6 июня 2019 г. С. 145–149.

5. Голубева, Е. Н., Якшина, Д. Ф. Исследование вклада атлантических и тихоокеанских вод в процесс сокращения арктического морского льда // *Сб. трудов Междунар. молодежной школы и конф. по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде "CITES-2019"*, Москва, 27 мая – 6 июня 2019 г. С. 138–141.

6. Малахова, В. В., Голубева, Е. Н. Отклик метангидратов донных отложений Северного Кедовитого океана на изменения климата // *Сб. трудов Междунар. молодежной школы и конф. по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде "CITES-2019"*, Москва, 27 мая – 6 июня 2019 г. С. 141–145.

7. Krupchatnikov, V., Martynova, Yu., Borovko, I., Platov, G. On the relationship between the variability of the mean flow and eddies with systematic errors in the models // *Сб. трудов Междунар. молодежной школы и конф. по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде "CITES-2019"*, Москва, 27 мая – 6 июня 2019 г. С. 14–16.

8. Borovko, I. V., Krupchatnikov, V. N. On the polar vortex streamer dynamics [Electron. resource] // *Bull. NCC. Ser.: Num. Modeling in Atmosphere, Ocean, and Environment Studies.* 2019. Iss. 17. P. 1–8. <https://nccbulletin.ru/article/1730>.

9. Kraineva, M., Golubeva, E., Platov G. Simulation of the near-bottom water warming in the Laptev Sea in 2007–2008. [Electron. resource] // *Bull. NCC. Ser.: Num. Modeling in Atmosphere, Ocean, and Environment Studies.* 2019. Iss. 17. P. 21–30. <https://nccbulletin.ru/article/1732>.

10. Krylova A.I., Lapteva N.A. Reproduction of runoff hydrograph in the Lena River basin using a hydrologically correct digital elevation model. [Electron. resource] // *Bull. NCC. Ser.: Num. modeling in Atmosphere, Ocean, and Environment Studies.* 2019. Iss. 17. P. 51–58. <https://nccbulletin.ru/article/1737>.

11. Леженин, А. А., Рапута, В. Ф., Амикишеева, Р. В. Экспериментальные и численные исследования процессов распространения примесей от высотных источников // Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики : труды Междунар. конф. в рамках "Марчуковских научных чтений-2019", Новосибирск, 1–5 июля 2019 г. С. 271–276. DOI: 10.24411/9999-016A-2019-10043.

12. Леженин, А. А., Рапута, В. Ф., Ярославцева, Т. В. Использование спутниковых данных в анализе распространения дымовых шлейфов ТЭЦ // 13-е Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу : тез. докл. / Под ред. М. В. Кабанова. Томск: Аграф-Пресс, 2019. С. 273–274.

13. Малахова, В. В. Субаквальная мерзлота арктического шельфа: оценка мощности и площади распространения // 13-е Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу : тез. докл. / Под ред. М. В. Кабанова. Томск: Аграф-Пресс, 2019. С. 78–79.

14. Леженин, А. А., Ярославцева, Т. В., Рапута, В. Ф. Модель оценивания параметров нижней атмосферы по данным спутниковых и наземных наблюдений // Интерэкспо Гео-Сибирь-2019 : сб. материалов Междунар. науч. конф., Новосибирск, 24–26 апр. 2019 г. Новосибирск: СГУГиТ, 2019. Т. 4, № 1. С. 44–51. DOI: 2618-981X-2019-4-1-44-51.

15. Малахова, В. В. Исследование динамики многолетнемерзлых пород шельфа арктических морей на основе численного моделирования // Моря России: фундаментальные и прикладные исследования : тез. докл. Всероссийской научной конференции, Севастополь, 23–28 сент. 2019 г. С. 236–237.

16. Малахова, В. В., Елисеев, А. В. Влияние неопределенности палеоклиматических сценариев на динамику субаквальной мерзлоты арктического шельфа // Интерэкспо Гео-Сибирь-2019 : сб. материалов Междунар. науч. конф., Новосибирск, 24–26 апр. 2019 г. Новосибирск: СГУГиТ, 2019. Т. 4, № 1. С. 99–105. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-4-1-99-105.

17. Михайлюта, С. В., Леженин, А. А., Гудовский П. Г. Ацетальдегид в атмосферном воздухе г. Красноярска // Интерэкспо Гео-Сибирь-2019 : сб. материалов Междунар. науч. конф., Новосибирск, 24–26 апр. 2019 г. Новосибирск: СГУГиТ, 2019. Т. 4, № 1. С. 106–112. DOI: 2618-981X-2019-4-1-106–112.

18. Морозов, С. В., Рапута, В. Ф., Коковкин, В. В. Оценка выпадений органических и неорганических примесей в окрестностях цементного завода // Интерэкспо Гео-Сибирь-2019 : сб. материалов Междунар. науч. конф., Новосибирск, 24–26 апр. 2019 г. Новосибирск: СГУГиТ, 2019. Т. 4, № 1. С. 113–120. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-4-1-113-120.

19. Платов, Г. А., Рапута, В. Ф., Крупчатников, В. Н., Голубева, Е. Н., Малахова, В. В., Леженин, А. А., Боровко, И. В., Крылова, А. И., Якшина, Д. Ф., Крайнева, М. В., Кравченко, В. В., Коробов, О. А. Создание и развитие многокомпонентного комплекса моделей гидродинамических процессов Земли // Пробл. информ. 2019. № 2 (43). С. 4–35. DOI: 10.24411/2073-0667-2019-00005.

20. Raputa, V. F., Lezhenin, A. A. The use of satellite information to estimate the parameters of smoke emissions of CHP. [Electron. resource] // Bull. NCC. Ser.: Numerical Modeling in Atmosphere, Ocean, and Environment Studies. 2019. Iss. 17. P. 67–76. <https://nccbulletin.ru/article/1741>.

21. Рапута, В. Ф., Зиновьев, А. Т., Ловцкая, О. В. Анализ процессов загрязнения малой реки на городской территории // Интерэкспо Гео-Сибирь-2019 : сб. материалов Междунар. науч. конф., Новосибирск, 24–26 апр. 2019 г. Новосибирск: СГУГиТ, 2019. Т. 4, № 1. С. 134–140. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-4-1-134-140.

22. Рапута, В. Ф., Алексеева, М. Н., Ярославцева, Т. В. Восстановление полей относительных концентраций примесей в атмосфере по измерениям теплового излучения источников // Интерэкспо Гео-Сибирь-2019 : сб. материалов Междунар. науч. конф., Новосибирск, 24–26 апр. 2019 г. Новосибирск: СГУГиТ, 2019. Т. 4, № 1. С. 52–58. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-4-1-52-58.

23. Iakshina, D. The influence of the Atlantic water on the ice cover state in the Eurasian basin of the Arctic Ocean based on numerical simulation. [Electron. resource] // Bull. NCC. Series: Numerical modeling in Atmosphere, Ocean, and Environment studies. 2019. Iss. 17. P. 9–19. <https://nccbulletin.ru/article/1731>.

24. Kravtchenko, V., Golubeva, E., Tskhai, A., Tarhanova, M., Kraineva, M., Platov, G. The Novosibirsk reservoir hydrothermal regime model. [Electron. resource] // Bull. NCC. Series: Numerical modeling in Atmosphere, Ocean, and Environment studies. 2019. Iss. 17. P. 31–49. <https://nccbulletin.ru/author/golubeva>.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Международная конференция "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики 2019", Новосибирск, 1–5 июля 2019 г., – 10 докладов, из них 3 пленарных (Голубева Е. Н., Малахова В. В., Платов Г. А., Якшина Д. Ф., Крылова А. И.).

2. Всероссийская конференция "Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования", Москва, ноябрь 2019 г. – 2 доклада (Малахова В. В., Платов Г. А., Голубева Е. Н.).

3. Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде "CITES-2019", Москва, 27 мая – 6 июня 2019 г. – 8 докладов, из них 4 пленарных (Платов Г. А., Малахова В. В., Голубева Е. Н., Крупчатников В. Н., Мартынова Ю. В., Боровко И. В., Якшина Д. Ф., Крайнева М. В.).

4. 13-е Сибирское совещание и школа молодых ученых по климатологическому мониторингу, Томск, 15–19 октября 2019 г. – 5 докладов, из них 1 пленарный (Малахова В. В., Амикишиева Р. А., Леженин А. А., Рапута В. Ф.).

5. Международный научный конгресс "Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019", Новосибирск, 17–26 апреля 2019 г. – 12 докладов (Платов Г. А., Малахова В. В., Леженин А. А., Рапута В. Ф., Кравченко В. В., Голубева Е. Н., Крайнева М. В., Крылова А. И.).

6. 24-й Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Новосибирск, 30 июня – 5 июля 2019 г. – 7 докладов (Леженин А. А., Рапута В. Ф., Малахова В. В., Боровко И. В., Крупчатников В. Н.).

7. Всероссийская научная конференция "Моря России: фундаментальные и прикладные исследования", Севастополь, 23–28 сентября 2019 г. – 1 доклад (Малахова В. В.).

8. Всероссийская конференция с международным участием "Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов", Бердск (Новосибирская обл.), 26–30 августа 2019 г. – 1 доклад (Леженин А. А., Рапута В. Ф.).

9. 24-я конференция "Аэрозоли Сибири", Томск, 26–29 ноября 2019 г. – 6 докладов (Леженин А. А., Рапута В. Ф., Крылова А. И.).

10. 2-я Международная научно-практическая конференция "Проблемы сохранения здоровья и обеспечения санитарно-гигиенического благополучия населения в Арктике", Санкт-Петербург, 13–15 ноября 2019 г. – 1 доклад (Рапута В. Ф.).

11. Научно-практическая конференция "Актуальные вопросы гигиены и эпидемиологии", Новосибирск, 5 декабря 2019 г. – 2 доклада (Рапута В. Ф.).

12. Выставка "Городские технологии", Новосибирск, 4–5 апреля 2019 г. – 1 доклад (Рапута В. Ф., Амикишиева Р. А.).

13. Liège Colloquium on Ocean Dynamics, Liège (Belgium), May 6–9, 2019 – 2 доклада (Платов Г. А., Голубева Е. Н., Якшина Д. Ф., Крайнева М. В.).

14. International scientific conference "Eurasian conference on applied mathematics", Novosibirsk, August 26–29, 2019 – 2 доклада, из них 1 пленарный (Платов Г. А., Голубева Е. Н., Крупчатников В. Н., Якшина Д. Ф., Боровко И. В.).

15. 20-я Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, Новосибирск, 2019 г. – 2 доклада (Крайнева М. В., Голубева Е. Н., Платов Г. А., Якшина Д. Ф.).

16. EGU General Assembly 2019, Vienna (Austria), April 7–12, 2019 – 1 доклад (Голубева Е. Н., Платов Г. А.).

17. Совещание в Мэрии г. Новосибирска, 17 апреля 2019 г. – 1 пленарный доклад (Рапута В. Ф. "Экспериментальное исследование и численный анализ распространения ртути в окрестностях Новосибирского завода химконцентратов").

Участие в организации научных мероприятий

1. Леженин А. А. – член организационного комитета Международной конференции "Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019", Новосибирск, 17–26 апреля 2019 г.;

2. Платов Г. А. – член программного комитета Международной конференции "Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019", Новосибирск, 17–26 апреля 2019 г.;

3. Крайнева М. В.:

– член организационного комитета Международной конференции "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики", Новосибирск, 1–5 июля 2019 г.,

– член организационного комитета молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 26 августа – 4 сентября 2019 г.

Участие в экспертной оценке экологической ситуации в Новосибирске

В депутатскую комиссию переданы материалы исследований по ртутному загрязнению территорий г. Новосибирска, проведены консультации. Направлены обращения и материалы этих исследований губернатору Новосибирской обл., мэру города, председателям Заксобраний.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 7

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 13

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 24

Докладов на конференциях – 66, в том числе 10 пленарных.

Участников организации конференций – 4

Кадровый состав

1. Платов Г. А. ав. лаб. д.ф.-м.н.

2. Амикишиева Р. А. инженер

3. Боровко И. В. н.с. к.ф.-м.н.

4. Голубева Е. Н.	в.н.с.	д.ф.-м.н.
5. Кравченко В. В.	м.н.с.	
6. Крайнева М. В.	м.н.с.	
7. Крупчатников В. Н.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
8. Крылова А. И.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
9. Леженин А. А.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
10. Малахова В. В.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
11. Рапуга В. Ф.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
12. Яковенко Г. Т.	программист	
13. Якшина Д. Ф.	м.н.с.	

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

Педагогическая деятельность

Боровко И. В.	– доцент СГУПС.
Голубева Е. Н.	– доцент НГУ.
Леженин А. А.	– доцент СИУ – филиал РАНХиГС
Крылова А. И.	– ст. преподаватель НГУ

Руководство студентами

1. Амикишиева Р. А. – 2-й курс магистратуры ФИТ НГУ, руководитель Рапуга В. Ф.
2. Романовская Н. А. – 1-й курс магистратуры ФЭН НЭТИ, руководитель Рапуга В. Ф.
3. Усова А. В. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Голубева Е. Н.
4. Тарханова М. А. – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Голубева Е. Н.
5. Юрова Ю. Д. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Платов Г. А.
6. Макаренко М. Е. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Крупчатников В. Н.

Руководство аспирантами

Коробов О. А. – 4-й год, ИВМиМГ, руководитель Платов Г. А.