

## ЛАБОРАТОРИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В АТМОСФЕРЕ И ГИДРОСФЕРЕ

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

### Важнейшие достижения

#### Морские волны тепла сибирского шельфа и прилегающих акваторий

Д.ф.-м.н. Голубева Е. Н., Крайнева М. В., д.ф.-м.н. Платов Г. А., Якшина Д. Ф., Тарханова М. А.

Проведено исследование климатической изменчивости Северного Ледовитого океана и его окраинных морей с помощью трехмерной физико-математической модели, описывающей законы взаимодействия атмосферы, океана и морского льда, в численной реализации, разработанной в ИВМиМГ СО РАН. Результаты моделирования, подкрепленные анализом данных наблюдений, показали нарастающую интенсивность повышения летней температуры в сибирских арктических морях и прилегающих глубоководных акваториях во втором десятилетии настоящего столетия. Формирование максимальных значений температуры, превышающих 90 %-ный порог всех среднемесячных значений за период с 1981 по 2010 гг., позволяет рассматривать это климатическое явление как одно из самых опасных, а именно как морские волны тепла. Серия численных экспериментов на основе модели продемонстрировала (рис. 1), что возникновение морских волн тепла в сибирских арктических морях и прилегающей акватории тесно связано с освобождением региона ото льда (рис. 2), которое в равной степени вызвано тепловым и динамическим состоянием атмосферы и обусловлено происходившими в течение последних двух десятилетий сокращением ледового покрова и повышением температуры атлантических вод, поступающих в Северный Ледовитый океан.

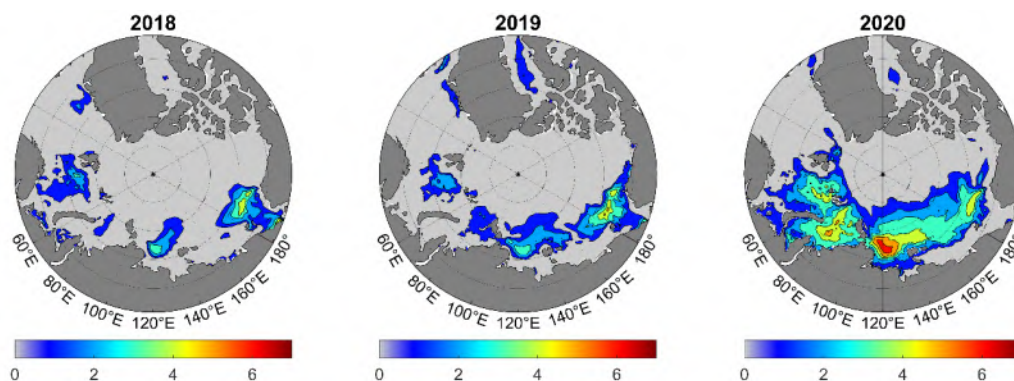


Рис. 1 – Аномалии модельной среднемесячной (сентябрь) поверхностной температуры, превышающие 90 %-ный порог всех среднемесячных значений за период с 1981 по 2010 гг.

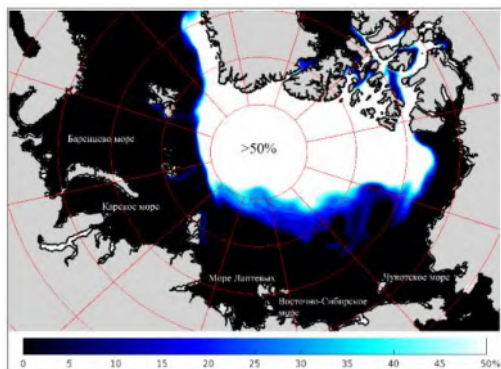


Рис. 2 – Среднее состояние концентрации морского льда (в %) для сентября 2018–2020 гг., полученное по результатам численного моделирования

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Golubeva, E., Kraineva M., Platov, G., Iakshina, D., Tarkhanova, M. Marine heatwaves in Siberian arctic seas and adjacent region // *Remote Sens.* 2021, 13(21), 4436. DOI: 10.3390/rs13214436 (WoS, Scopus Q1).
2. Golubeva, E., Platov, G., Kraineva, M. Numerical modeling of the consequences of "marine heatwaves" in the North Pacific for the Arctic Ocean // *EGU Gen. Assemb. Apr. 19–30, 2021.* EGU21-6921. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-6921.
3. Kraineva, M. V., Golubeva E. N. (2022) Formation of temperature anomalies in the Laptev Sea (2000–2020 Years) // *Processes in GeoMedia.* Chaplina T. (eds.). Springer Geology. Springer, Cham. Vol. V. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85851-3\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85851-3_19).

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

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

Номер государственной регистрации 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 2021 г.**

На этапе 2021 г. работы велись по следующим направлениям:

1. Разработка и тестирование новой версии модели климатической системы на основе модели INMCM5 (ИВМ РАН) и совместной модели океана и морского льда SibCIOM (ИВМиМГ СО РАН).

Модель ИВМ РАН версии INMCM48 является совместной моделью атмосферы и океана. Атмосферный блок имеет разрешение  $2 \times 1.5$  градусов по долготе и широте и 21 вертикальный уровень. В нем интерактивно рассчитываются концентрации 10 аэрозолей и их радиационные свойства. Океанический блок имеет разрешение  $1 \times 1.5$  градусов по долготе и широте.

Атмосферный и океанический блок могут работать независимо друг от друга, если настроить считывание необходимых океанических и атмосферных полей соответственно, например, из данных реанализа. При совместной работе связь между блоками осуществляется с помощью интерфейса MPI. Атмосферный блок передает океаническому 11 различных полей: коэффициенты трения CU, CT; давление на поверхности океана SLP; коротковолновая и длинноволновая радиации SW и LW; абсолютная температура TA; влажность QA; скорости атмосферы UA и VA; осадки PREC; потоки пресной воды OFWFLX.

Также осуществляется передача концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере и количество воды, попадающей в океан из устьев рек RIV (имеет размерность количества рек в модели). Блок океана и льда передает атмосферному блоку два поля: температуру поверхности океана SST и сплоченность льда CICE. Кроме того, передаются две постоянные: поток углерода в атмосферу SCC и общая концентрация углерода в океане SCOC.

Модель SibCIOM – совместная модель океана и льда. Океанический блок имеет разрешение от 1 до  $0.25^\circ$  в зависимости от конфигурации. Ледовые и океанические поля рассчитываются интерактивно, а другие необходимые данные, такие как атмосферные данные или данные с земли, считываются из баз данных. Работа модели осуществляется с помощью вспомогательной программы coupler, которая в определенные моменты получает от ледового и океанического блоков, атмосферных данных и данных земли необходимые поля, обрабатывает их и отправляет нужные данные ледовому и океаническому блоку для дальнейших расчетов. Обмен полями осуществляется также с помощью интерфейса MPI.

В новой совместной модели используется атмосферный блок модели INMCM и организуется передача необходимых атмосферных полей в coupler вместо использования готовых данных. В свою очередь, coupler передает необходимые атмосферному блоку океанические и ледовые данные модели SibCIOM.

Набор передаваемых атмосферным блоком данных включает следующие поля: zlvl – высота нижнего уровня скорости ветра, ztlvl – высота нижнего уровня температуры и влажности воздуха, uatm, vatm – компоненты скорости ветра, potT – потенциальная температура воздуха, Tair – абсолютная температура у поверхности, Qa – влажность воздуха, rhoa – плотность воздуха, Fsw, Flw – низходящие потоки коротковолновой и длинноволновой радиации, Frain – скорость выпадения осадков в виде дождя, Fsnow – скорость выпадения осадков в виде снега, cld – балл общей облачности, small\_riv – расход речных стоков, CO<sub>2</sub> – концентрация углекислого газа

Атмосферный блок получает два поля и две константы: SST – температура поверхности океана, SICE – сплоченность льда, SCC – суммарный поток углерода из океана в атмосферу, SCOC – общая концентрация углерода в океане.

Решена задача создания дополнительных функций, осуществляющих передачу описанных полей между блоком coupler и атмосферным блоком с помощью интерфейса MPI. Протестирована техническая работа данной модели. Проведен предварительный тестовый расчет. Подготовлена серия численных экспериментов для исследования реакции климатической системы на увеличение концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере с учетом его поглощения океаном.

Усовершенствована базовая версия численной крупномасштабной модели океана SibCIOM. Новая версия модели включает эффект погружения льда в поверхностный слой океана. Модифицирован алгоритм расчета скорости течений с целью оптимизации проведения вычислений на параллельных компьютерах.

Численная модель океана и морского льда показала свою эффективность в исследовании климатических изменений, происходящих в Северном Ледовитом океане и его окраинных морях. На основе численных экспериментов было промоделировано экстремальное повышение температуры поверхностных вод в сибирских арктических морях в конце второго десятилетия настоящего столетия.

Проведены эксперименты по тестированию модели INMCM4.8. Значимый вклад в динамику климатической системы вносит стратосфера, поэтому для решения задач о чувствительности климатической системы к тем или иным изменениям важно, чтобы атмосферный блок модели адекватно описывал стратосферные динамические процессы. Проведен численный эксперимент, воспроизводящий современный климат. Численный эксперимент проводился для 100 лет модельного времени, из которых анализировались последние сорок. Были рассмотрены динамические поля в стратосфере Южного полушария за период с августа по декабрь, полученные с помощью INMCM4.8.

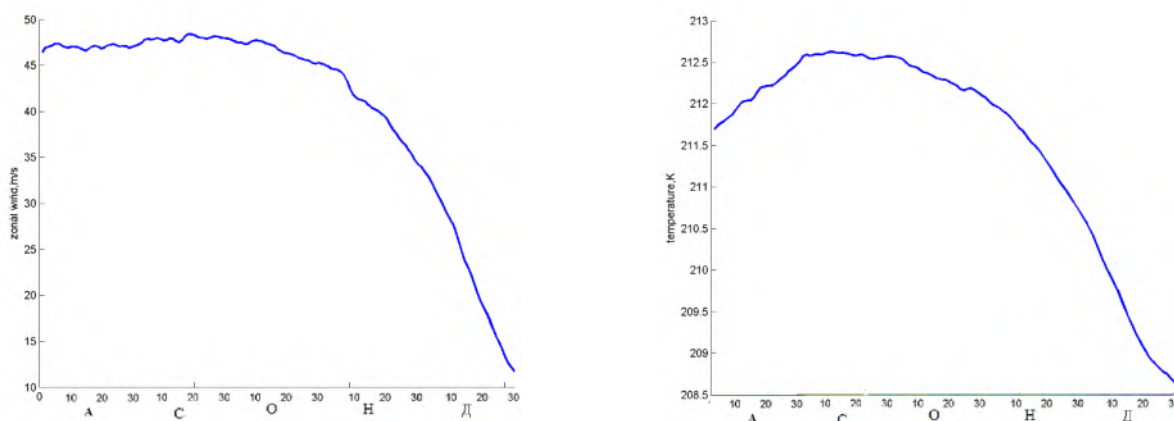


Рис. 3 – Средняя скорость западного ветра на 60° ю. ш. и средняя температура в области 20° ю. ш. – 40° ю. ш. на уровне  $p = 50$  гПа в зависимости от времени года (с августа по декабрь)

Исследования показали, что определяющее влияние на устойчивость и характер разрушения полярного вихря оказывает температура субтропической стратосферы. На рис. 3 показан средний ход температуры субтропической стратосферы и скорости на 60° ю. ш. с августа по декабрь по модельным данным. В целом можно утверждать, что модель хорошо описывает эти величины, хотя процесс разрушения вихря в модели несколько запаздывает по сравнению с данными наблюдений: средняя дата разрушения антарктического полярного вихря – 18 декабря. Видно, что в этот период ход скорости зонального ветра повторяет ход температуры стратосферы, что может указывать на то, что основным фактором разрушения вихря является уменьшение градиента температуры стратосферы. Разрушение полярного вихря происходит посредством взаимодействия планетарных волн с зональным потоком. Общепринятым методом диагностики распространения волн является метод потоков Элиассена – Пальма. На рис. 4 показана вертикальная составляющая потока Элиассена – Пальма для модельных данных, характеризующая распространение волн в вертикальном направлении. В начале декабря, непосредственно перед разрушением вихря, происходит усиление вертикального распространения планетарных волн в стратосферу.

Модельные данные в целом адекватно описывают процессы взаимодействия планетарных волн со средним потоком и разрушения полярного вихря, несмотря на некоторую количественную погрешность.

2. Подготовлена концепция модели климата для долгосрочного прогнозирования, включающая блок биогеохимии атмосферы, суши и океана.

Согласно подготовленной концепции, биогеохимический блок включает четыре компоненты, функционирующие в составе соответствующих подпрограммных модулей в каждой из компо-

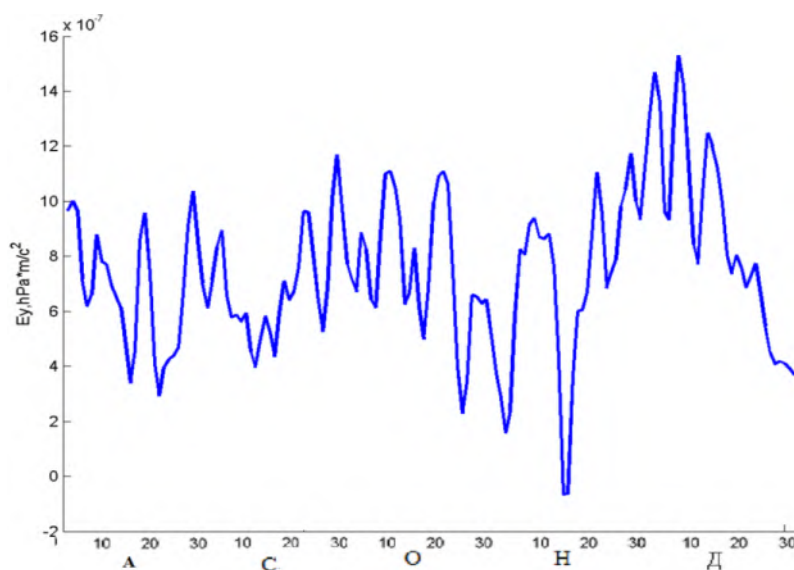


Рис. 4 – Вертикальная компонента потока Элиассена – Пальма на 60° ю. ш. при уровне давления 50 гПа

нент климатической системы: суша, атмосфера, океан и лед. Цель – дать максимально исчерпывающее описание динамики парниковых газов, существенно влияющих на климат планеты и ее регионов. Блок взаимодействия модулей *coupler* обеспечивает взаимодействие этих модулей друг с другом, а также, в отсутствие социо-экономической составляющей, обеспечивает необходимым набором антропогенных и вулканических источников парниковых и других газов. В составе модуля суши биогеохимический блок описывает эволюцию источников и поглотителей этих газов в составе растительных ландшафтов, болот, озер, почвы, вечной мерзлоты. В атмосферном блоке обеспечивается описание распространения и химической трансформации основных парниковых газов. Блок океана описывает поступление газов на границе с нижней атмосферой, его трансформацию в биологической цепочке и в цепи химических превращений, а также поглощение в результате выпадения остатков жизнедеятельности на дне океана. Блок морского льда призван описать или параметризовать биологическую активность, формирующуюся на нижней поверхности льда на границе с морской водой. В свою очередь, наличие парниковых газов в атмосфере определяет ее прозрачность для прямой и отраженной коротковолновой радиации, для длинноволнового излучения с поверхности суши, океана и льда (снега). Наличие биологической активности в верхнем слое океана и на границе льда и воды определяет их прозрачность для проникающего коротковолнового излучения.

### 3. Разработка концепции модели речного стока для регионального моделирования.

Цель работы – на основе концептуальной климатической модели формирования речного стока не только воспроизвести скорость добега воды с бассейна р. Лены к замыкающему створу, но и меженные расходы р. Лены в течение холодного периода гидрологического года. При достаточной точности расчета стока меженные и минимальные расходы могут позволить оценить естественные ресурсы подземных вод. В обновленную версию модели включена параметризация болот с помощью коэффициента задержки, который напрямую влияет на скорость как поверхностного, так и речного стоков.

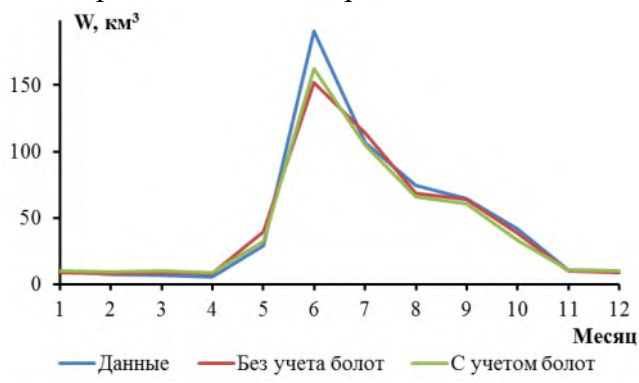


Рис. 5 – Среднегодовой модельный объем стока за период с 1980–2011 гг. на г/п Кюсюр

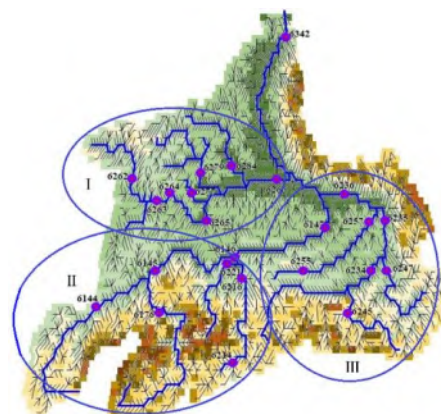
На рис. 5 представлены результаты моделирования с учетом болот в долине нижнего течения р. Лены и Центрально-Якутской низменности и без болот.

Проведенный анализ характера колебаний речного стока на основе кумулятивной кривой стока выявил три однородных гидрологических района (рис. 6). Калибровка сосредоточенных параметров модели для каждого из районов позволила выполнить моделирование зимнего меженного стока, согла-

сующегося с данными базы R-ArcticNet для расходов воды. Ранее основным фактором увеличения зимнего сезонного стока в замыкающем створе Кюсюр являлось регулирование стока Вилюйским водохранилищем. Переход от модели с сосредоточенными параметрами к модели с полураспределенными параметрами позволил моделировать зимний меженный сток в рамках концептуальной климатической модели речного стока.

Рис. 6 – Схематизация бассейна р. Лены разрешением  $(1/3)^\circ \times (1/3)^\circ$  с выделенными гидрологическими районами:

- I* – бассейн реки Виллой (закрывающий створ Хатырык-Хомо 6266);
- II* – бассейн верховья р. Лены (закрывающий створ Солянка 6146),
- III* – бассейн р. Алдан (закрывающий створ Верхоянский Перевоз 6236)



На рис. 7 представлены результаты моделирования по двум вариантам модели: с сосредоточенными (модельные расчеты *I*) и полураспределенными параметрами (модельные расчеты *II*) в закрывающих створах Хатырык-Хомо (бассейн р. Виллой), Табага (Верхняя и Средняя р. Лена), Верхоянский Перевоз (бассейн р. Алдан) и Кюсюр (бассейн р. Лены). На врезанных диаграммах представлено сравнение модельного зимнего стока с результатами наблюдений.

На основе модели с полураспределенными параметрами проведено моделирование межгодовой изменчивости годового стока по данным реанализа MERRA. Результаты моделирования показали небольшой линейный тренд для годового стока с бассейна р. Лены за период исследования с 1985–2011 гг. (рис. 8). Отчасти разницу между модельными результатами и данными на г/п Кюсюр можно объяснить тем, что разность "осадки – испарение" по данным реанализа MERRA

Рис. 7 – Данные объемов воды в соответствующих закрывающих створах и модельные расчеты по двум вариантам модели

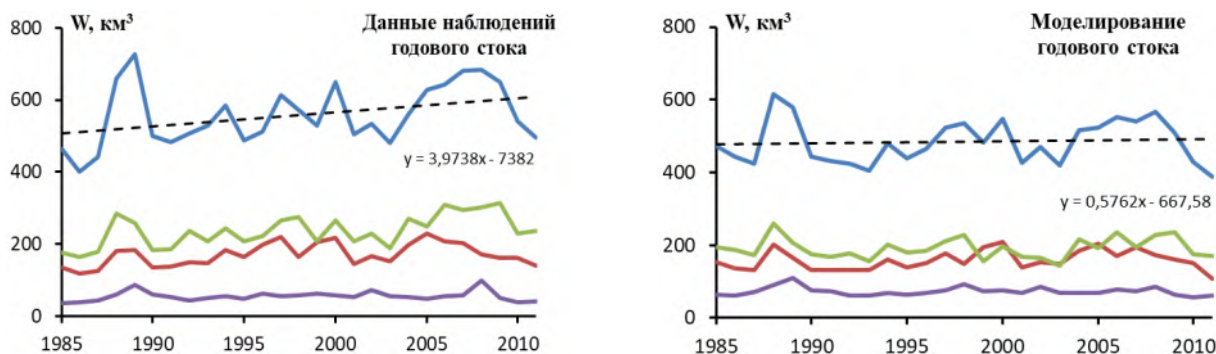
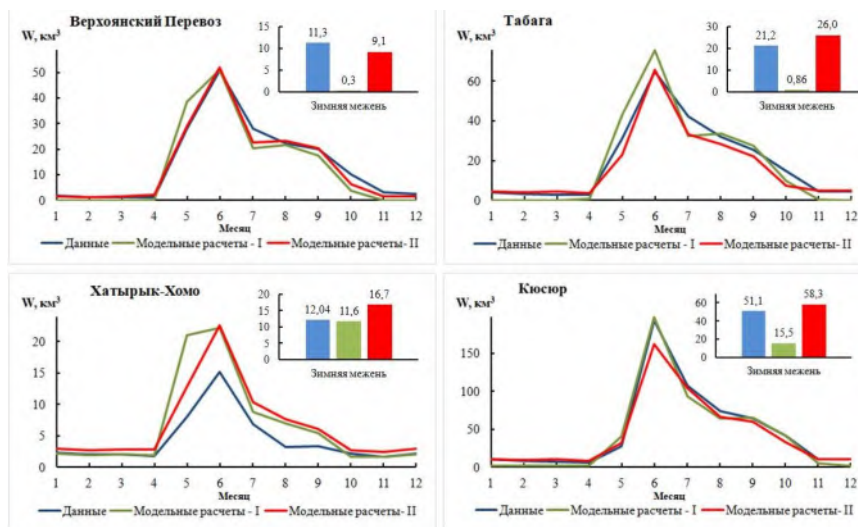


Рис. 8 – Многолетние колебания годового стока по данным R-ArcticNet, ANYST и модельным результатам на реках Лены (Кюсюр, Табага), Алдан (Верхоянский Перевоз) и Виллой (Хатырык-Хомо)

Многолетний среднегодовой водный баланс по бассейну р. Лены  
за период 1980–2011 гг. по данным MERRA (мм)

	Осадки, Р	Испарение, Е	Р-Е	Речной сток (Кюсюр)
Бассейн р. Лены	888,7	732,3	156,4	229,5

на 31,8 % меньше наблюдаемого стока (табл.), хотя в долгосрочной перспективе эти слагаемые уравнения баланса должны быть близки друг другу.

4. Разработка численной модели для оценки современного состояния субмаринной криолитозоны в донных отложениях арктического шельфа. Верификация модели.

Исследование пространственного распространения и состояния шельфовых многолетнемерзлых пород (ММП) возможно лишь на основе ретроспективного математического моделирования теплофизического состояния грунта за достаточно длительные промежутки времени (десятки и сотни тысяч лет). Такие модели базируются на палеотемпературных сценариях, описывающих ход температур на поверхности пород при трансгрессиях, регрессиях моря и оледенениях. Разработанная модель субмаринной криолитозоны основана на решении нестационарной тепловой задачи Стефана при наличии в расчетной области движущихся фронтов фазовых превращений влаги, а на границах области – переменных граничных условий разных родов. Модель включает два связанных одномерных уравнения диффузии – тепла и соли. Для уравнения диффузии тепла на границе между мерзлыми и талыми породами используются условие равенства температуры грунта температуре замерзания воды и условие Стефана для движения границы раздела фаз. Теплоемкость и теплопроводность зависят от состояния отложений (замороженные или незамерзшие). Значения этих двух коэффициентов также зависят от глубины под морским дном и состава пород. Допускается распространение соли только в незамерзших слоях. Скрытая теплота плавления во время образования и таяния порового льда учитывается явно.

Влияние солености на температуру замерзания приводит к зависимости между уравнениями тепло- и солепереноса для мерзлого слоя, при этом распространение тепла и соли в незамерзшем грунте не зависят друг от друга. Донные отложения считаются насыщенными влагой, и содержание воды в каждом слое соответствует его пористости. Принципиальная особенность математической модели такой задачи состоит в учете не только фазовых переходов, но и переноса соли в пористой среде. В отличие от классической задачи Стефана, температура фазового перехода зависит от давления и солености. Эта особенность является существенной, поскольку приводит к возникновению ситуации, когда фазовые переходы реализуются в протяженной области.

Для задания верхних граничных условий используются палеогеографические сценарии изменений температуры поверхности пород, различавшиеся в соответствии с районированием каждого шельфа по истории их развития. При разработке сценариев учитывался ряд существенно изменяющихся факторов природной среды. В результате температура на поверхности пород в расчетный период получалась как синтез нескольких зависимостей: зависимости изменения среднегодовых температур водной толщи моря с глубиной; зависимости скорости поднятия (опускания) уровня моря от времени; изменения температур поверхности пород на осушенных участках в расчетный период; широтных и секторальных изменений климатических характеристик. На нижней границе расчетной области задавалась постоянная во времени плотность глинного потока тепла (условие II рода), основанная на пространственных данных.

Для решения задачи используется метод ловли фронта в узел пространственной сетки. Размеры расчетной области по вертикали составили 1500 м. Согласно предварительным численным оценкам, такие размеры области обеспечивают отсутствие влияния нижней границы на динамику подошвы мерзлых толщ. Моделирование проводится для области СЛО в каждой сеточной ячейке с пространственным разрешением  $1^\circ$  при глубине воды менее 150 м. Период расчета – один полный ледниковый цикл (120 тыс. лет). Численная реализация модели основана на методе прогонки на дискретной вычислительной сетке с вертикальным шагом 0.5 м и неявной схеме по времени с шагом 1 месяц.

Проведено тестирование разработанной модели субмаринной криолитозоны с помощью математического моделирования на участке, обеспеченном геокриологическими данными. Так как фактические данные для шельфа отсутствуют, были использованы данные буровой скважины (с-А) прибрежной области о. Новая Сибирь. Геологический разрез задавался в соответствии с результатами бурения в верхних 200 метрах (глубина скважины), а в нижних слоях (до 1500 м) – в соответствии с данными геологических исследований на островах Новая Сибирь и Фаддеевский и справочных данных (рис. 9а). По геотермическим наблюдениям в скважине среднегодовая температура составила  $-13.2^\circ\text{C}$ , мощность мерзлого слоя, вычисленная по геотермическому градиенту, 235–255 м. При построении модели имеющиеся по фактическим данным пласты бурого угля объединялись в один или два пласта с суммарной мощностью 46 и 35 м. На рис. 9б приведены три модельные термограммы. Наиболее близкие к измеренной температуре на глубине 200 м в скважине с-А ( $-2^\circ\text{C}$ ) значения получены для разреза, включающего один объединенный пласт мощностью 46 и 35 м при теплопроводности  $\lambda = 0.55$  и  $0.42$  мВт/м·К соответственно. Отклонения от измеренной температуры составили  $+0.2$  и  $-0.5^\circ\text{C}$ .

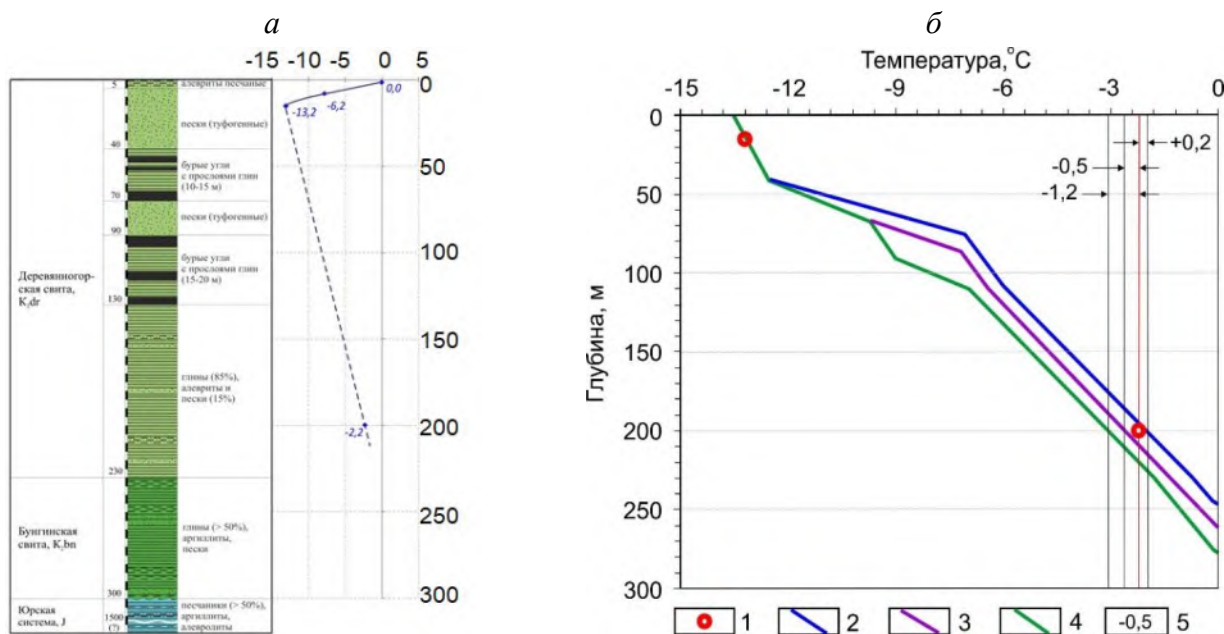


Рис. 9 – Верификация модели субаквальной мерзлоты: а – геологический разрез скважины по фактическим данным; б – модельные оценки мощности мерзлоты: 1 – температура по данным геотермических наблюдений в скважине на глубинах 15 и 200 м; 2–4 – модельные оценки при задании различных пластов бурого угля (2 – мощностью 35 м и  $\lambda = 0,42$  Вт/м·К; 3 – мощностью 46 м и  $\lambda = 0,55$  Вт/м·К; 4 – тоже при задании в виде двух пластов общей мощностью 46 м при  $\lambda = 0,55$  и  $0,7$  Вт/м·К в верхнем и нижнем слоях соответственно); 5 – величина отличия модельной температуры пород от натурной,  $^\circ\text{C}$



5. Разработка модели анализа данных наземного и спутникового мониторингов загрязнения в окрестностях точечного источника.

Разработана численная модель восстановления характеристик активной фазы подъема дымового шлейфа по данным наблюдений.

Достаточно полная картина распространения дымовых шлейфов от труб крупных промышленных предприятий и ТЭЦ фиксируется на снимках из космоса, позволяющих детально проследить активную фазу подъема дымовых факелов и их дальнейший пассивный перенос в атмосфере. Траектории шлейфов характеризуют скорость и направление ветра. При определенных метеорологических условиях визуальная протяженность шлейфов может достигать нескольких десятков километров.

Методы численного решения уравнений гидротермодинамики атмосферы дают возможность описать процессы распространения дымовых смесей в локальном и региональном масштабах. Для этого необходимо использование больших объемов информации, включающей сведения о текущих метеорологических условиях и характеристиках источников выбросов примеси. Как правило, часть параметров источников отсутствует либо требует существенного уточнения. К ним, в частности, следует отнести эффективную высоту подъема дымового шлейфа и интенсивность эмиссии источника. Необходима также детальная информация о высотном профиле ветра.

Разработана численная модель восстановления характеристик активной фазы подъема дымового шлейфа по данным наблюдений. Базовыми условиями в модели оценивания являются решения уравнений гидротермодинамики атмосферы. С использованием спутниковой информации (рис. 10а) проведено численное восстановление изменения температуры и скорости подъема газозвушной смеси от высотной трубы Гусиноозерской ГРЭС (рис. 10б, 10в).

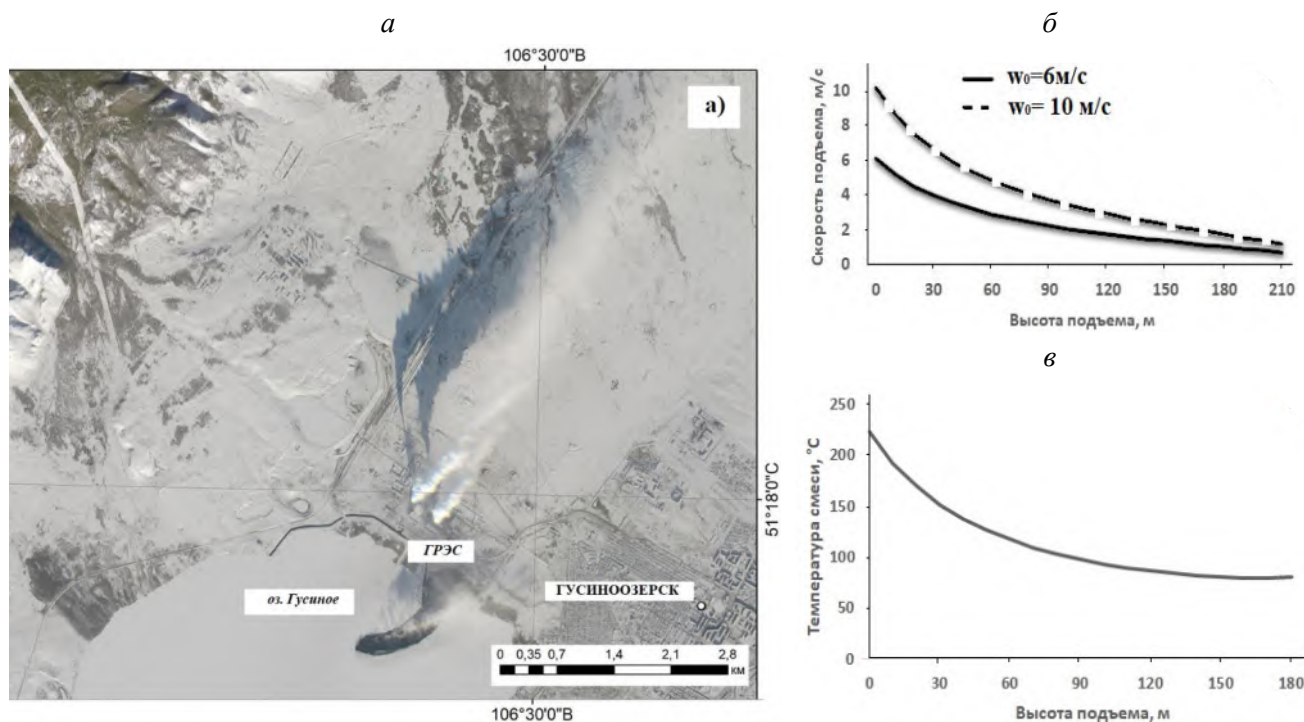


Рис. 10 – Спутниковый снимок Гусиноозерской ГРЭС (а); оценки скорости подъема (б) и изменения температуры (в) по оси дымового шлейфа от основной трубы станции

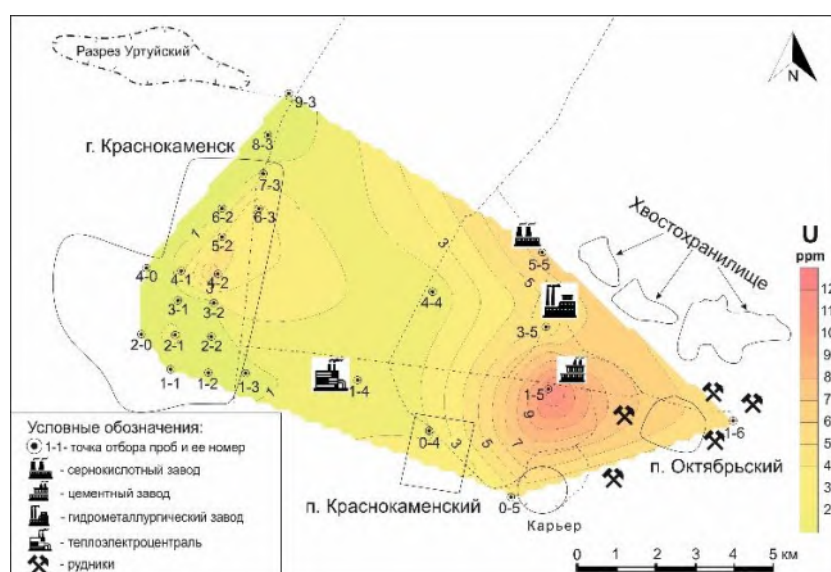
Проведенные исследования показали, что применение предлагаемого подхода наиболее эффективно в зимний период. На спутниковых снимках благодаря снежному покрову обеспечивается цветовая однородность земной поверхности. При таких условиях наблюдается наиболее высокая контрастность тени шлейфов на поверхность. Использование спутниковых наблюдений позволяет получить объективную оценку высоты подъема дымового факела. В зависимости от метеорологических условий и параметров выбросов дополнительная высота подъема дымовых шлейфов может достигать нескольких сотен метров, что необходимо учитывать при расчетах распространения примесей в атмосфере.

Разработаны модели оценивания полей концентраций примесей в окрестностях пылящих площадных источников.

Цель данного исследования – изучение процессов атмосферных выносов урана от хвостохранилищ в окрестностях г. Краснокаменск Забайкальского края по данным изучения листьев тополя – биогеохимического индикатора и разработка методов численной интерпретации результатов экспериментальных исследований атмосферного загрязнения под воздействием нерегулярных наземных источников.

Разработаны модели оценивания полей концентраций примесей в окрестностях пылящих площадных источников. В качестве базового соотношения используются соотношения баланса массы легкой примеси в приземном слое атмосферы. Проведена апробация предложенного подхода на данных биомониторинга урана в районе г. Краснокаменск. В исследованиях использовались листья бальзамического и черного тополей. Этот вид древесной растительности широко применяется для озеленения селитебных и промышленных зон городов, что обеспечивает возможность пробоотбора по относительно равномерной сети и заданным направлениям. Схема отбора проб представлена на рис. 11. Анализ данных биомониторинга показал существенную динамику уменьшения содержания урана в листьях с удалением от хвостохранилища в западном и северо-западном направлениях. Западное направление включает точки отбора проб (1-5), (0-4), (1-4), (1-3), (1-2), (1-1). Северо-западное направление содержит точки (3-5), (4-4), (8-3), (6-2), (9-3). Для указанных выше направлений на основе предложенных моделей оценивания проведено численное восстановление концентраций урана в листьях. Результаты численного моделирования представлены на рис. 12.

Рис. 11 – Схема отбора проб листьев тополя. Ореол рассеяния урана от хвостохранилища Приаргунского горно-химического комбината (г. Краснокаменск) по данным биомониторинга



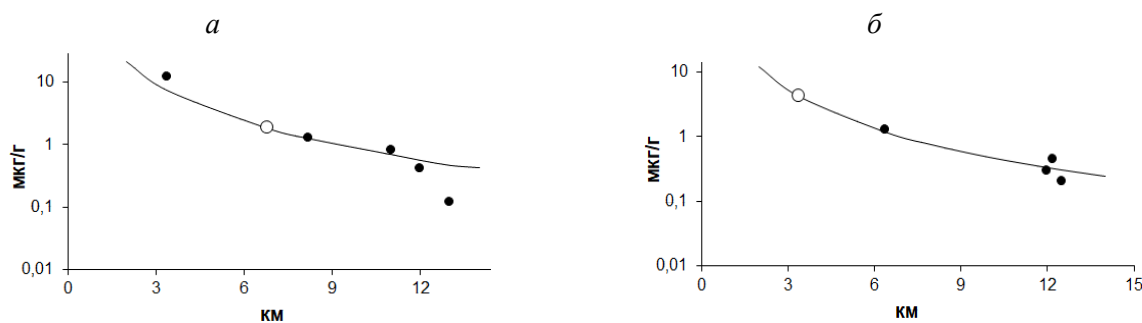


Рис. 12 – Измеренные и численно восстановленные содержания урана в западном (а) и северо-западном направлениях (б) от источника

Совместный анализ экспериментальных исследований и данных численного моделирования позволяет оценить экологическую ситуацию на определенных территориях, выявлять и контролировать источники примесей. В перспективе это создает возможности для разработки соответствующих геоинформационных систем. Для дальнейшего развития эффективных моделей оценивания атмосферного загрязнения от наземных источников необходимо создание информативных сетей биогеохимического мониторинга.

Проведены численные исследования влияния метеорологических условий на процессы длительного атмосферного загрязнения городских территорий.

Целью исследования является анализ взаимосвязей между режимом ветра и повышенными концентрациями бенз(а)пирена (БП) в воздухе г. Искитиме в зимние периоды. Проведены численные исследования влияния метеорологических условий на процессы длительного атмосферного загрязнения городских территорий, базирующиеся на совместном анализе данных метеорологических станций и информации, получаемой со стационарных постов контроля качества воздуха на сети Росгидромета. Предложенный подход был апробирован на г. Искитиме, включенном в программу "Чистый воздух". По данным Росгидромета, в 2018 г. среднегодовая концентрация БП в городе составила 5.2 ПДК. В зимний период 2018 г. среднемесячная концентрация БП достигала 15–20 ПДК.

Выполнен анализ связей повторяемости выносов примесей от доминирующих источников с измеренными концентрациями БП на стационарном пункте наблюдения г. Искитима для зимних периодов времени. Исследовано влияние повторяемости ветров различных направлений на формирование уровня атмосферного загрязнения на посту контроля. С учетом взаимного расположения пункта наблюдения и основной автомагистрали города показан заметный вклад ветров юго-западных направлений в увеличение концентраций БП.

Получена статистическая зависимость между количеством штилей, фиксируемых в течение месяца на метеорологической станции г. Искитима, и значениями концентраций БП. На рис. 13 приведены значения повторяемостей штилей и концентраций БП для январей, февралей 2014–2019 гг. Выполнен анализ статистических связей данных наземного мониторинга загрязнения снежного покрова со снеговым индексом (NDSI), полученным с использованием спутниковой информации. На основе полученных зависимостей проведен анализ пространственной картины загрязнения территории г. Искитима и его окрестностей.

Результаты проведенных исследований позволили выявить существенный вклад влияния повторяемостей штилей и слабых ветров в повышенные уровни содержания БП в атмосфере

г. Искитима в зимних условиях. С учетом взаимного расположения пункта контроля и находящейся рядом автомагистрали показано заметное влияние повторяемости ветров юго-западных направлений на увеличение концентрации БП.

### 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.

На основе модели океана и морского льда проведены численные эксперименты по чувствительности гидрологических и ледовых полей Северного Ледовитого океана к формированию блокирующих атмосферных процессов в арктических шельфовых морях и прилегающей акватории. Рассматривались два варианта блокирующих режимов: циклонический и антициклонический. Эксперименты были проведены на 5 лет модельного времени. Введенные аномалии динамического атмосферного воздействия накладывались на поле ветра из данных реанализа NCEP/NCAR. Блокирующий антициклон (циклон) задавался повышением (понижением) атмосферного давления в выбранной точке моря с радиусом действия около 800 км. Скорость ветра, рассчитанная на основе геострофических соотношений, добавлялась к скорости ветра, поступающей в модель из данных реанализа. Дополнительное изменение температуры атмосферы, сопутствующее формированию блокирующего режима, не предполагалось. Центр действия добавочного циклона (антициклона), расположен в море Лаптевых, около западного побережья Новосибирских островов. Временной интервал расчета 2016–2020 гг. Результаты численных экспериментов показывают, что усиление южных ветров способствует раннему освобождению и позднему установлению ледового покрова на шельфе сибирских морей. Ветры нагонного характера способствуют сохранению ледового покрова даже в летний период. В зимний период также заметны изменения в ледовом покрове. В частности, при антициклоническом блокинге в море Лаптевых перестает формироваться припай в море Лаптевых, полынья формируется не на материковом склоне, а у побережья западной части моря. Увеличение периода открытой воды летом способствует повышению температуры поверхностного слоя: в Восточно-Сибирском море при заданном циклоне и в море Лаптевых, в том числе и в глубоководной части бассейна при антициклоне. Интересны изменения, происходящие ниже поверхностного слоя в южной части Евразийского бассейна. Для двух

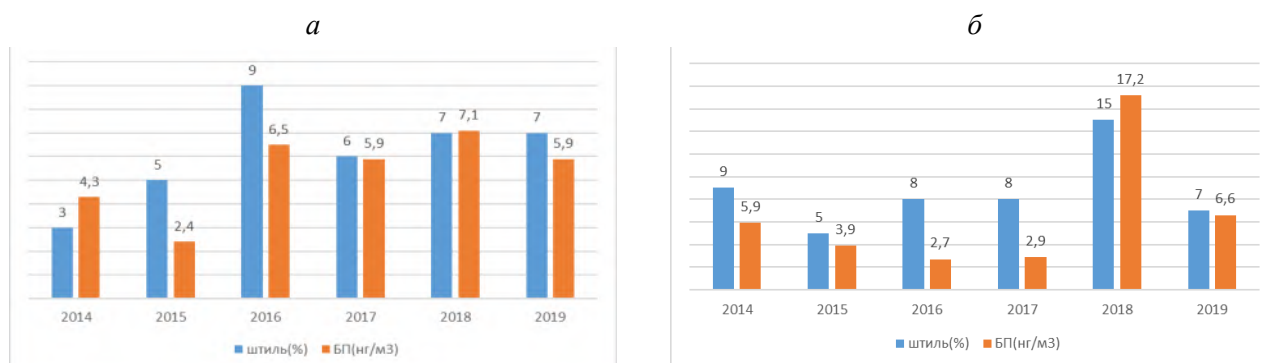


Рис. 13 – Повторяемости штилей (%) и измеренных концентраций БП (нг/м<sup>3</sup>) на стационарном посту г. Искитима в зимние месяцы 2014–2019 гг.: а – январь; б – февраль

вариантов добавочного форсинга (циклон/антициклон) численная модель показывает реакцию, противоположную поверхностной: повышение температуры поверхностного слоя с глубиной меняется на охлаждение в слое атлантических вод, и наоборот. Анализ результатов моделирования приводит к следующему заключению: сохранение ледового покрова в глубоководной части моря Лаптевых при циклоническом форсинге не позволяет прогреться верхнему слою океана, однако сохраняющийся ледовый покров препятствует выхолаживанию верхнего слоя и интенсивному перемешиванию в осенне-зимний период, тем самым сокращая и обмен тепла на верхней границе атлантических вод, что приводит к постепенному повышению температуры в слое атлантических вод. При включении антициклонического добавочного форсинга, наоборот, в летний период в море Лаптевых происходит прогрев поверхностных слоев, а в осенне-зимний период в дополнение к интенсивному перемешиванию усиливается апвеллинг вдоль материкового склона, способствующий охлаждению вод атлантического слоя. Анализ результатов моделирования показывает, что ниже поверхностного слоя различия в двух экспериментах наиболее выражены в Евразийском бассейне. Просмотр результатов моделирования в динамике показал, что отклонения в поле температуры от результатов контрольного эксперимента, возникшие на материковом склоне моря Лаптевых, сдвигаются на восток (в соответствии с траекторией следования атлантических вод) и постепенно там затухают.

**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 (2–40 Тг/год) невелики по сравнению с наземными источниками, такими как заболоченные территории. Однако океанические источники  $\text{CH}_4$  в Арктике могут быть недооценены и играть значимую роль из-за больших объемов метана, которые находятся под морским дном в слое многолетнемерзлых пород и в зоне стабильности газовых гидратов. Количественная оценка выхода метана из морского дна и его дальнейшего потока в атмосферу – основные нерешенные вопросы, касающиеся морского цикла метана.

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 г. Проведен модельный анализ эмиссии метана на акватории арктических морей как следствие выхода газа на границе раздела океан – дно, вызванного деградацией субаквальной мерзлоты и увеличением ее проницаемости. Совместные расчеты по моделированию состояния водных масс, ледового покрова и переноса растворенного метана дали возможность:

- оценить перенос метана, поступившего из донных отложений в водную толщу;
- оценить, какое количество  $\text{CH}_4$  сможет достичь атмосферы;
- оценить роль океана и морского льда в этом процессе;
- оценить влияние климатических изменений последних десятилетий в этом процессе.

Получены оценки эмиссии метана в ледовый период. Выбросы в этот период связаны с участками открытой воды в ледяном покрове – трещинами и полыньями. Концентрация  $\text{CH}_4$  подо льдом в поверхностных водах может достигать 5000 нМ. В результате значительные выбросы получены в ледовый период с участков полыней. Однако количество таких выбросов ограничено

открытой акваторией. Полученная пространственная изменчивость потоков метана в атмосферу в первую очередь связана с особенностями циркуляции и ледовой обстановки. Самые высокие потоки  $\text{CH}_4$  получены в осенние месяцы. Это указывает на роль конвективного перемешивания водного столба и увеличения скорости ветра в этот период. Расчетные выбросы метана из морей арктического шельфа в атмосферу не превысили 2 Тг  $\text{CH}_4$ /год. Показано, что моря Восточно-Сибирского шельфа вносят наибольший вклад в общую эмиссию метана в регионе.

Впервые получена оценка количества поступившего из донных отложений метана, которое достигает атмосферы. В зависимости от рассматриваемого периода эта доля составляет 4–10 %. Более продолжительные периоды открытой воды и снижение сплоченности льда способствуют увеличению доли метана, который может выйти в атмосферу в осенние и зимние месяцы. Это в свою очередь приводит к росту суммарного годового потока метана. В условиях продолжающегося и прогнозируемого потепления климата в ближайшие годы рост выбросов метана в арктических морях будет определяться не только потоками газа из отложений, а также процессом изменения ледяного покрова Арктики.

**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 малопараметрические модели реконструкции полей концентраций и определения параметров источников. На основе наземного и спутникового мониторингов снежного покрова проведено оценивание загрязнения территорий Искитимо-Линёвской промышленной зоны, численно восстановлены поля аэрозольных выпадений примесей от Чернореченского цементного и Новосибирского электродного заводов в зимнем сезоне 2020/21 гг. Предложена модель оценивания и проведено численное восстановление содержания урана на маршрутах отбора листьев тополя в окрестностях хвостохранилища Новосибирского завода химконцентратов и золоотвала Новосибирской ТЭЦ-4. На основе статистического анализа метеорологических условий и данных наблюдений на постах Росгидромета в г. Искитиме и Новосибирске установлены причины возникновения чрезвычайно высоких концентраций бенз(а)пирена в зимние месяцы 2018 г. По результатам проведенных исследований подготовлены базы данных многокомпонентного загрязнения снежного покрова в окрестностях Новосибирской ТЭЦ-5 и Чернореченского цементного завода. Разработана геоинформационная система для численного анализа данных наземного и спутникового мониторинга загрязнения территорий Новосибирской области.

### **Прочие гранты**

**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.

В рамках постановок обратных задач атмосферного переноса примесей проведено построение моделей реконструкции полей регионального загрязнения территорий точечными и площад-

ными источниками с использованием малого количества точек наблюдений. Предложены алгоритмы оценивания параметров моделей, оптимального размещения точек наблюдений. На основе предложенного подхода выполнено численное восстановление полей выпадений тяжелых металлов на снеговой покров в окрестностях г. Иркутска.

Разработана численная модель восстановления характеристик активной фазы подъема дымового факела по данным наблюдений. Базовыми условиями в модели оценивания являются решения уравнений гидротермодинамики атмосферы. Применение аналитического представления решений системы уравнений движения и притока тепла для нейтрально стратифицированной атмосферы позволило представить оценки параметров модели в явном виде. Выполнен численный анализ активной стадии подъема дымовых шлейфов от высотных труб Гусиноозерской ГРЭС и Ново-Иркутской ТЭЦ на базе зимних спутниковых снимков.

На основе асимптотик решений уравнения турбулентной диффузии предложены модели оценивания полей концентраций диоксидов серы, азота, субмикронных фракций аэрозольных частиц по данным измерений в пос. Листвянка на станции EANET. Наиболее значимыми источниками этих примесей являются крупные ТЭЦ, расположенные в городах Иркутске, Ангарске, Шелехове. Основное внимание уделяется анализу эпизодов прохождения дымовых шлейфов ТЭЦ через пункт наблюдений. В качестве дополнительных сведений используются данные измерений с метеорологических и аэрологических станций. Для территории Южного Байкала представлены результаты численного восстановления полей концентраций и оценивания параметров трансформации загрязняющих примесей от удаленных источников.

**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 – д.ф.-м.н. Платов Г. А.

Цель проекта – улучшение представления о том, как быстрое сокращение морского льда взаимосвязано с физическими и химическими изменениями в полярных океанах и атмосфере. Для эффективного планирования жизнедеятельности и своевременной адаптации к полярным и глобальным климатическим изменениям проект стремится достичь более полного понимания причин и последствий климатических процессов в полярных широтах. Модели системы климата и Земли (ESM) являются ключевыми инструментами прогнозирования изменений климата с целью смягчения их воздействия на человека и экономику и способствуют их постепенной адаптации к новым условиям. Однако эти модели имеют существенные недостатки в описании процессов взаимодействия океана, льда/снега и атмосферы в полярных районах, что ограничивает их способность прогнозировать удаленные и обратные связи и взаимодействия в данной системе.

В ходе реализации 1-го этапа по направлению исследований в 2021 г. решены следующие задачи:

1. Проведен анализ климатических изменений последнего столетия исходя из данных многолетних наблюдений применительно к полярным регионам, выявлены атмосферные циркуляционные моды (ЕОФ), их тенденций. Получен синтезированный форсинг для проведения

экспериментов по оценке чувствительности климатической системы по отношению к индивидуальным возмущениям этих мод.

2. Проведены предварительные численные эксперименты с помощью модели SibCIOM для "исторического" периода. Настроены параметры модели для проведения основной серии экспериментов с моделью SibCIOM.

3. Выявлены основные циркуляционные моды для арктического региона и отдельных морей и их взаимосвязи с теплосодержанием верхнего слоя океана.

4. Проведена апробация новой национальной модели климатической системы Земли на основе имеющейся модели INMCM с включением модели океана и льда SibCIOM. Проведено техническое тестирование программного кода.

5. Выполнен анализ наиболее известных и востребованных интегрированных оценочных математических моделей экономики и климата и их модернизация с учетом целей проекта.

При решении задач проекта основным инструментом исследования является численное моделирование, основанное на использовании современных сложных моделей климатической системы, моделей промежуточной сложности и мезомасштабных региональных моделей с использованием данных натурных и спутниковых наблюдений. В рамках такой иерархии моделей возможна теоретическая интерпретация результатов моделирования сложных моделей в терминах более простых в широком спектре масштабов исследуемых процессов.

### **Проекты РНФ**

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

Руководитель – д.ф.-м.н. Платов Г. А.

В отчетном году основное внимание было уделено исследованию чувствительности динамики крупномасштабной циркуляции и климата атмосферы Арктики к изменчивости Северного Ледовитого океана и морского льда. В рамках этой задачи с использованием модели INMCM48, разработанной в ИВМ им. Марчука РАН, проведена серия численных экспериментов для выявления непосредственной роли процесса сокращения морского льда в формировании климатических трендов в Северном полушарии. В качестве механизмов, способствующих сокращению морского льда, использовались увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере и уменьшение отражательной способности льда и снега. Одним из мотивов для изучения реакции атмосферы на сокращение морского льда в Арктике являлась ее возможная связь с экстремальными погодными явлениями в средних широтах, одна из основных причин возникновения которых – рост волновой активности струйных течений в атмосфере.

Численные результаты показали следующие наиболее заметные последствия уменьшения ледового покрова: ослабление температурного градиента на уровне тропопаузы в средних широтах, уменьшение скорости зонального ветра в районе 50–60°N и ее увеличение в субтропиках, а также усиление волновой активности в Европе, Западной Америке и Чукотке и ее ослабление на юге Сибири и в Казахстане. Изменения волновой активности атмосферных струйных течений приводят к изменению частоты и интенсивности блокирующих процессов в атмосфере. Проведенный по результатам численных экспериментов анализ интенсивности блокирования показал, что в



результате сокращения арктических льдов максимум интенсивности у Британских островов смещается на восток, усиливая зимние уральские блокирования на 3–6 %. Исследования взаимосвязи между уральским блокированием и фоновыми условиями, связанными с потеплением Арктики над Баренцевым и Карским морями, подчеркивают, что интенсивность уральского блокирования в значительной степени связана с этим потеплением. Зимой интенсивность блокировок в районе Аляски и Охотского моря также увеличивается. Летом изменения интенсивности незначительны, около 1 %, и в основном касаются участков, свободных ото льда. Сравнение частоты и интенсивности блокирования показало, что чем чаще происходят блокировки, тем меньше их интенсивность.

Также в экспериментах по сокращению арктических льдов выделены общие сезонные тенденции преобразования волновой энергии в блокирующую, которые показали одновременное увеличение энергии блокирований в северных и снижение в южных районах Северного полушария зимой. Летние тренды включают ослабление блокирующих процессов в атмосфере в районах, близких к субтропикам, а также их ослабление вдоль линии морей Баренцева, Карского, Лаптевых и усиление в Беринговом и Чукотском морях. Кроме того, в летний период блокирования усиливаются в Восточной Европе, однако при чрезмерной потере льда это усиление становится незначительным.

В рамках обозначенной выше задачи рассмотрено еще одно опасное климатическое явление – морские волны тепла (МВТ). В условиях климатического тренда ослабленный полярный вихрь способствует увеличению локальной волновой активности и, как следствие, увеличению меридиональных потоков между континентом и Северным Ледовитым океаном. В течение отчетного периода были выполнены следующие работы: проанализированы межгодовые изменения температуры поверхности моря на основе спутникового набора данных о глобальной суточной температуре поверхности океана (SST), чтобы выявить наиболее заметные процессы и области большинства изменения в 2000–2020 гг.; с помощью численного моделирования выявлены наиболее важные для этого изменения физические процессы.

Проведенный анализ данных спутниковых и наземных наблюдений показал, что в сибирских арктических морях наиболее аномальные события происходили с 2018 по 2020 г. Наиболее сильные МВТ возникли у береговой линии, но потепление распространилось на северные глубоководные районы и приблизилось до 80°N. Линейные тренды общей продолжительности МВТ указывают на их интенсивное увеличение над шельфовой зоной, а не только в устьях рек. В среднем продолжительность МВТ в Карском море, море Лаптевых и Восточно-Сибирском море увеличилась на 10–12 дней в год. Значительная часть (около 40 %) этих трендов объясняется трендом потепления климата в арктических морях. Также выявлено, что в течение 2016–2020 гг. происходило постепенное расширение площади, занимаемой МВТ в море Лаптевых и прилегающей глубоководной области. В 2018–2020 гг. в море Лаптевых наблюдалось потепление, превышающее климатический тренд.

Трехмерное численное моделирование Северного Ледовитого океана, основанное на совместной модели морского льда и океана SibCIOM, показало ускоренное сокращение морского льда и рост SST в сибирских арктических морях к концу 2011–2020 гг. Серия тестов на чувствительность показала, что

– основными факторами, влияющими на потерю морского льда в Арктике и формирование аномальной температуры к северу от сибирских арктических морей, в равной степени являются термическое и динамическое состояние нижних слоев атмосферы;

– SST значительно увеличивается в начале лета в полынье, образованной морскими ветрами на краю припайного льда; припай и полыньи вносят существенный вклад в распространение МВТ в направлении глубоководных районов океана;

– тепловое воздействие р. Лены в основном способствует лишь повышению температуры воды в самой мелководной части моря Лаптевых, особенно важным и продолжительным оказалось повышение температуры придонной воды;

– состояние морского льда, сложившееся в зимний период в масштабе одного года, является одним из определяющих факторов наряду с тепловыми и динамическими эффектами атмосферы; чувствительность модели к изменениям состояния океанических полей на этом масштабе менее значительна;

– различия, связанные с начальным распределением ледяного поля, уменьшаются в первые три года; отклонения ледяного поля, вызванные различиями исходных термохалинных океанических полей, наоборот, увеличиваются в течение первых 2–3 лет, а затем постепенно уменьшаются до уровня 15–20 % относительно среднегодового распределения;

– уменьшение таяния на нижней поверхности льда летом из-за более холодного состояния океана способствует лучшему сохранению ледяного покрова;

– наличие льда летом препятствует поглощению атмосферного тепла и образованию областей аномально теплых поверхностных вод даже при чрезвычайно теплом состоянии атмосферы региона;

В ходе выполнения проекта также проведено исследование с целью изучения и оценки поглощения тепла глубоким океаном, оценки влияния поглощения  $\text{CO}_2$  океаном на глобальный углеродный цикл и на глобальный и региональный климат. На основе численного моделирования потоков  $\text{CO}_2$  из атмосферы и дальнейшего его переноса морскими течениями получена правдоподобная картина распространения  $\text{CO}_2$  в океане. Выявлена необходимость проведения модельного эксперимента на период не менее 1000 лет при активном включении биогеохимического блока для более полного описания процесса.

Дополнительное исследование, расширяющее рамки представленного проекта в направлении исследования чувствительности динамики крупномасштабной циркуляции и климата к процессам таяния ледниковых щитов Арктики и формирования баланса пресной воды в океане на примере ледника Гренландии, завершилось в отчетном году опубликованием статьи в *Journal of Climate* (WoS, Scopus, Q1). В ходе проведенных исследований роли стока пресной воды ледников Гренландии получены оценки масштабов времени формирования и времени пребывания Гренландской пресноводной аномалии (ГПА) в Приполярной Северной Атлантике при реализации различных режимов поступления пресной воды. Получена связь между реакцией пресной воды и временем пребывания ГПА в регионе. Главный вывод состоит в том, что ГПА в основном накапливается в приповерхностных слоях, что отличает эту пресноводную аномалию от других, но в итоге она оказывается сильно рассредоточена в толще воды и оказывает относительно небольшое влияние на итоговую соленость.

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

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

На основе численных расчетов с использованием модели океана и морского дна SibCIOM и данных реанализа NCEP/NCAR проанализировано изменение температуры придонного слоя морей Сибирского шельфа с начала 21 столетия до настоящего времени. По результатам численного моделирования выделены области, в которых получено повышение температуры придонного слоя моря. В Карском море выделяется область, граничащая с устьями Оби и Енисея, и его восточная часть; в море Лаптевых – западная часть около п-ва Таймыр и глубоководная часть. В шельфовой области заметно повышение температуры около дельты р. Лены и в юго-восточной части моря. Графики среднемесячных значений температуры поверхностного и придонного слоев в отдельных точках показывают, что в прошедшем десятилетии увеличилась амплитуда сезонных колебаний, заметно повышение температуры не только в осенние, но и в зимние месяцы. Наименьшие изменения за период расчета произошли в придонном слое Восточно-Сибирского моря.

Получены оценки состояния и области распространения субаквальной мерзлоты в донных отложениях шельфовых морей Арктики (Карского, Восточно-Сибирского и Лаптевых) с учетом климатических изменений в регионе для последних 20 тыс. лет. Результаты моделирования мощности многолетнемерзлых пород показывают, что они отражают влияние глубины моря, географического положения и геотермического потока из земных недр. Влияние глубины моря – это влияние продолжительности периодов осушения и периодов затопления шельфа для тех или иных изобат. Многолетнемерзлые породы во внеледниковых условиях непрерывно существуют в течение всего расчетного периода (120 тыс. л. н. – современность) в мелководной части шельфа. На внешнем шельфе (глубина воды более 75 м) на протяжении среднего плейстоцена голоцена ММП возникали и деградировали.

Площадь распространения ММП на шельфе морей (Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского) в период максимального охлаждения шельфа 20 тыс. лет назад составила  $2.2 \times 10^6$  км<sup>2</sup>. Объем донных отложений, которые могли находиться в мерзлом состоянии, составил  $9.8 \times 10^{14}$  м<sup>3</sup>. Дальнейшее затопление шельфа в период голоцена привело к деградации подводной мерзлоты. Полученная площадь распространения субаквальных мерзлых отложений для 1950 г. составила около  $2 \times 10^6$  км<sup>2</sup>. Объем мерзлых донных отложений уменьшился и составил  $7 \times 10^{14}$  м<sup>3</sup>. Более 80 % площади, занимаемой ММП, расположено в морях Восточно-Сибирского шельфа. В пределах каждого шельфового моря мощность мерзлоты наибольшая у берега, где затопление произошло недавно, и уменьшается к бровке шельфа. Моря Лаптевых и Восточно-Сибирское имеют среднюю мощность вечной мерзлоты, превышающую 300 м. В Карском море распространение мерзлоты сильно смещено в сторону восточной части моря. Районы с мерзлотой мощностью более 600 м расположены в море Лаптевых и в Восточно-Сибирском море около Новосибирских островов (рис. 15а).

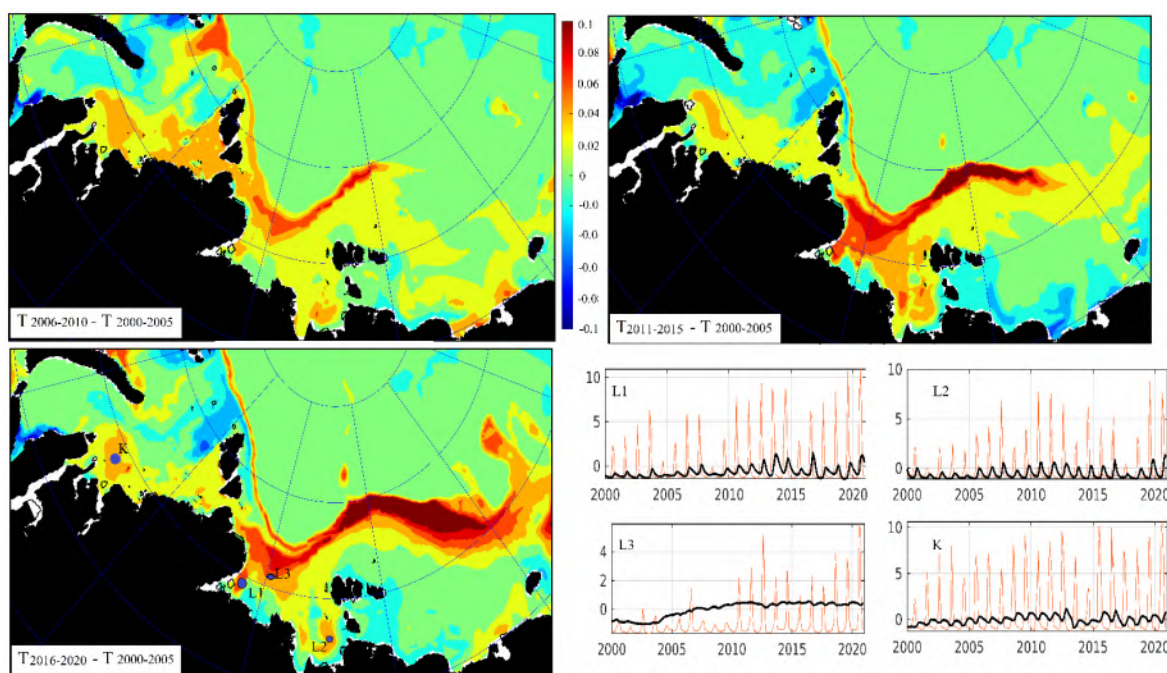


Рис. 14 – Изменение температуры придонного слоя сибирских арктических морей в период 2000–2020 гг. по результатам численного эксперимента. Представлены поля разности среднегодовой температуры, осредненной за пятилетний период, и начальный период шести лет расчета 2000–2006 гг.

В выделенных точках морей Лаптевых и Карского показан сезонный ход температуры в поверхностном (красный цвет) и придонном (черный цвет) слоях

Верхняя граница субаквальной мерзлоты находится ниже морского дна. Толщина протаивания верхнего слоя донных отложений зависит от глубины моря, температуры придонной воды и засоленности осадков. Глубина моря определяет период затопления данного участка шельфа морской водой. Получено, что верхняя граница мерзлого слоя для 1950 г. расположена на глубине 2–20 м ниже морского дна в зависимости от области шельфа (рис. 15б). Максимальное заглубление верхней границы ММП получено для западной части Карского моря, внешнего шельфа и южной части моря Лаптевых в районе дельты р. Лены.

Скорость деградации мерзлоты с момента затопления шельфа морской водой до 1950 г. составила 1.0–2.5 см в год. Максимальные скорости деградации получены для внешнего шельфа всех морей, а также для западной части Карского моря. Сокращение ММП более выражено со стороны нижней границы и происходит за счет геотермического потока.

Получены оценки мощности зоны стабильности газовых гидратов (ЗСГГ) для всей области мелководных арктических шельфов (рис. 16). Формирование и существование зоны стабильности газовых гидратов коррелирует с динамикой нижней границы многолетнемерзлого слоя. Толщина зоны стабильности составила до 800 м для внутреннего шельфа (глубина воды 10–20 м) и менее 200 м для внешнего шельфа (глубина воды 70–100 м) (рис. 16а). Глубина нижней границы ЗСГГ зависит от значений геотермического потока и глубины моря, подобно динамике подошвы слоя мерзлых пород. Положение верхней границы зависит прежде всего от глубины моря, что объясняется влиянием на ЗСГГ дополнительного давления за счет водного слоя. Верхняя граница расположена на 140–220 м ниже морского дна (рис. 16б). Повышенная интенсивность потока тепла в рифтовых структурах приводит к отсутствию условий образования газогидратов в северной части моря Лаптевых.

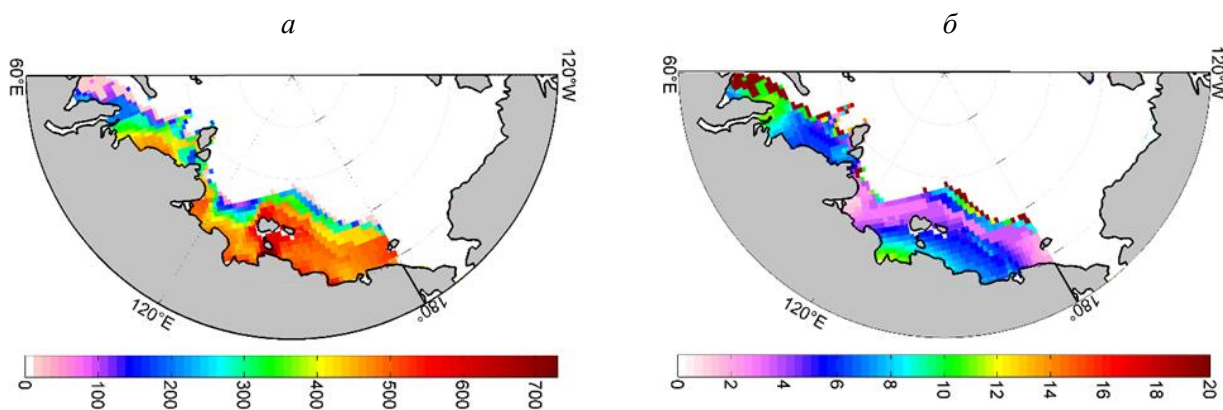


Рис. 15 – Модельное распространение и мощность субаквальной мерзлоты в донных отложениях шельфа арктических морей (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское), полученное для 1950 г.:

- a* – глубина нижней границы ММП под морским дном (м);  
*б* – глубина верхней границы ММП под морским дном (м)

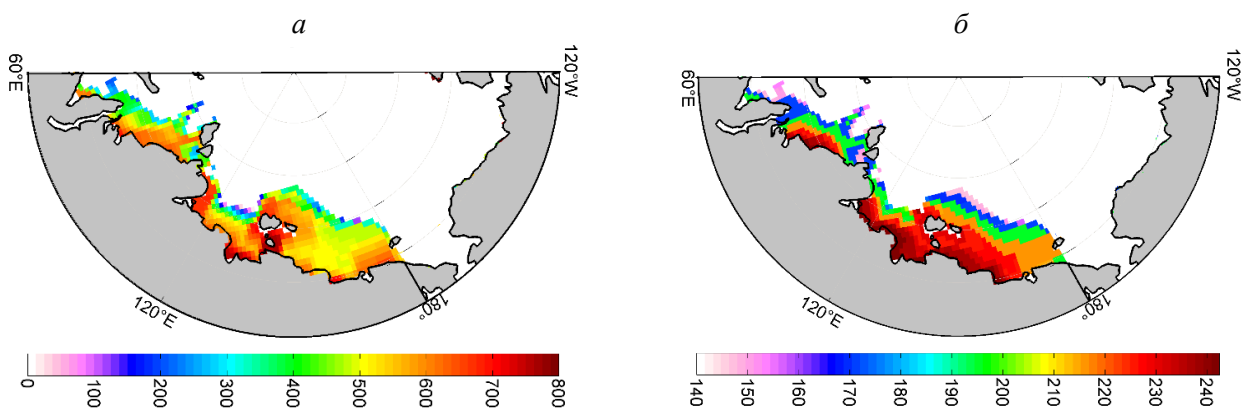


Рис. 16 – Зона стабильности гидратов метана:

- a* – рассчитанная мощность (м); *б* – глубина залегания верхней границы под морским дном (м)

Увеличение концентрации соли в порах сдвигает границу термодинамической устойчивости гидратов метана в сторону более высокого давления и более низкой температуры. Заглубление верхней границы ЗСГГ до глубины более 140 м ниже морского дна делает газовые гидраты изолированными слоем мерзлых пород. Наиболее сильное засоление на такой глубине характерно для внешнего шельфа и составляет примерно 20 %. Дополнительное смещение вниз верхней границы ЗСГГ составило 15 м на внешнем шельфе и 2 м на внутреннем. Изменения нижней границы ЗСГГ, глубина залегания которой соответствует мало засоленным (внешний шельф) или незасоленным грунтам (внутренний шельф), слабо выражены. Влияние засоления при расчете термобарических условий устойчивости метангидрата приводит к сокращению ЗСГГ, однако из-за большой глубины залегания в донных отложениях это влияние составляет не более нескольких процентов.

Проведено исследование роли покровного оледенения в эволюции и современном состоянии криолитозоны и зоны стабильности гидратов газов на примере северной части Восточно-Сибирского шельфа, где сохранились пластовые льды в отложениях островов Анжу (Новая Сибирь и Фаддеевский) мощностью 20–30 м и протяженностью 2–3 км Построены палеогеографический сценарий развития шельфа в последние 200 тыс. лет и модель геологического строения, характеризующая состав и теплофизические свойства пород.

Публикации

**Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science**

1. Dukhovskoy, D. S., Yashayaev, I. E., Chassignet, P., Myers, P. G., Platov, G., Proshutinsky A. Time scales of the Greenland freshwater anomaly in the Subpolar North Atlantic // *J. Climate*. No 34. P. 8971–8987. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0610.1.
2. Golubeva, E., Kraineva, M., Platov, G., Iakshina, D., Tarkhanova, M. Marine heatwaves in Siberian Arctic Seas and adjacent region // *Remote Sens.* 2021. Vol.13(21), 4436. DOI: 10.3390/rs13214436.
3. Gavrillov, A., Malakhova, V., Pizhankova, E. The role of paleogeographic events in the evolution and current state of the East Siberian Shelf permafrost // *Proc. SPIE, 27th Intern. symp. on atmospheric and ocean optics, atmospheric physics.* 2021. Vol. 11916, 1191656. DOI: 10.1117/12.2602055.
4. Gochakov, A. V., Antokhina, O. Y., Krupchatnikov, V. N. Martynova Yu. Method for identifying and clustering Rossby wave breaking events in the Northern hemisphere // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2021. No 46. P. 10–18. <https://doi.org/10.3103/S1068373921010027>.
5. Krylova, A. I., Lapteva, N. A. Modeling of the long-term annual and seasonal runoff in the Lena River basin // *Proc. SPIE, 27th Intern. symp. on atmospheric and ocean optics, atmospheric physics.* 2021. Vol. 11916, 119165P. DOI: 10.1117/12.2603165.
6. Malakhova, V. V., Golubeva, E. N. Impact of climate change on methane emissions in the Arctic seas // *Proc. SPIE, 27th Intern. Symp. on atmospheric and ocean optics, atmospheric physics.* 2021. V. 11916, 1191657. DOI: 10.1117/12.2602061.
7. Platov, G., Krupchatnikov, V., Gradov, V., Borovko, I., Volodin, E. Analysis of the Northern hemisphere atmospheric circulation response to Arctic ice reduction based on simulation results // *Geosci.* 2021. Vol. 11, iss. 373. <https://doi.org/10.3390/geosciences11090373>.
8. Platov, G. A., Krupchatnikov, V. N., Gradov, V. S., Volodin, E. M., Borovko, I. V. The role of Arctic ice reduction in the formation of climatic trends // *Proc. SPIE 11916, 27th Intern. Symp. on atmospheric and ocean optics, atmospheric physics.* 2021. 119166J. DOI: 10.1117/12.2603421.
9. Raputa, V. F., Lezhenin, A. A. Estimation of the dynamic and thermal characteristics of the rise of a smoke plume from satellite information // *Atmosph. and Ocean. Opt.* 2021. Vol. 34, No 5. P. 433–437. DOI: 10.1134/S1024856021050171.
10. Raputa, V. F., Grebenshchikova, V. I., Lezhenin, A. A., Yaroslavtseva, T. V., Amikishieva, R. A. Analysis of aerosol pollution processes in the vicinity of the Irkutsk aluminum plant // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2099 012030 (2021). DOI:10.1088/1742-6596/2099/1/012030.
11. Raputa, V. F., Lezhenin, A. A., Obolkin, V. A., Khodzher, T. V. Estimation of gas and aerosol concentrations with data of measurements in southern Baikal // *Proc. SPIE 27th Intern. Symp. on atmospheric and ocean optics, atmospheric physics.* 2021. Vol. 11916, 119166A. DOI: 10.1117/12.2603382.
12. Zaripov, R. B., Pavlyukov, Y. B., Krupchatnikov, V. N. Studying physical mechanisms of development of Black Sea quasi-tropical cyclones using a high-resolution atmosphere model // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2021. Vol. 46. P. 423–433. <https://doi.org/10.3103/S1068373921070013>.
13. Zuev, V. V., Savelieva, E., Borovko, I. V., Krupchatnikov, V. N. Influence of the subtropical stratosphere on the Antarctic polar vortex during spring 2019 // *Proc. SPIE, 27th Intern. Symp. on atmospheric and ocean optics, atmospheric physics.* 2021. Vol. 11916, 1191677. DOI: 10.1117/12.2599029.

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

1. Amikishieva, R. A., Raputa, V. F., Lezhenin, A. A. Ground and satellite monitoring of atmospheric pollution processes in urban areas // CEUR Workshop Proc., 3006. 2021. P. 392–398. DOI:10.25743/SDM.2021.12.66.046.
2. Kraineva, M., Golubeva, E. Formation of heat anomalies in the Laptev Sea aquatorium (2000–2020 years) // Proc. in GeoMedia. 2021. Vol. V.
3. Lezhenin, A. A., Raputa, V. F. Analysis of urban air pollution based on network observation // (2021) CEUR Workshop proc., 3006. P. 493–498. DOI:10.25743/SDM.2021.64.81.059.
4. Raputa, V. F., Lezhenin, A. A. Methods for estimate the dynamic and thermal characteristics of smoke plumes from high sources // CEUR Workshop Proc., 3006. 2021. P. 541–549. DOI: 10.25743/SDM.2021.53.21.065.

**Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ**

1. Амикишиева Р. А., Рапута В. Ф., Соловьёва И. А. Наземный и спутниковый мониторинг процессов загрязнения Искитимо-Линевской промышленной зоны // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 4. № 1. С. 60–65. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-60-65.
2. Аржанов М. М., Малахова В. В. Оценка условий накопления газогидратов под влиянием покровного оледенения // Экология. Экономика. Информатика. Сер.: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2021. Т. 1. № 6. С. 70–74.
3. Гаврилов А. В., Малахова В. В., Деревягин А. Ю., Пижанкова Е. И., Попова А. А. Мерзлые породы Восточно-Сибирского шельфа и их связь с геологическими событиями среднего неоплейстоцена голоцена // Геология морей и океанов: Материалы 24-й Междунар. науч. конф. по морской геологии. М.: ИО РАН, 2021. Т. 4. DOI:10.29006/978-5-6045110-7-7.
4. Гаврилов А. В., Малахова В. В., Пижанкова Е. И. Математическое моделирование эволюции субмаринных мерзлых толщ и зоны стабильности газогидратов (на примере Восточно-Сибирского шельфа) // "Современные методы и средства океанологических исследований" (МСОИ-2021) : Материалы 17-й Междунар. науч.-техн. конф. Т. 1. М.: Ин-т океанологии им. П. П. Ширшова РАН, 2021. С. 255–259.
5. Гаврилов А. В., Малахова В. В., Пижанкова Е. И., Попова А. А. Мощность многолетне-мерзлых пород о. Новая Сибирь: результаты численного моделирования // 14-е Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу : тез. докл. рос. конф. с междунар. участием " / Под ред. Е. А. Головацкой. Томск, 2021. С. 6–9.
6. Градов В. С., Платов Г. А. Оптимизация сеточного разбиения для параллельных вычислений в модели SibCIOM // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 4, № 1. С. 111–117. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-111-117.
7. Градов В. С., Боровко И. А., Крупчатников В. Н. Влияние сокращения морского льда в Арктике на структуру циркуляции Атмосферы. // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 4, № 1. С. 103–110. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-103-110.
8. Леженин А. А., Рапута В. Ф. Методы оценивания загрязнения атмосферы города по данным мониторинга // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 4, № 1. С. 150–156. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-159-166.
9. Малахова В. В. Модельная оценка эмиссии метана в атмосферу с акватории арктических морей // 14-е Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому

мониторингу : тез. докл. рос. конф. с междунар. участием " / Под ред. Е. А. Головацкой. Томск, 2021. С. 29–32.

10. Мартынова Ю. В., Матюхина А. А., Воропай Н. Н., Крупчатников В. Н. Особенности формирования снежного покрова в Сибири и их связь с аномалиями динамики атмосферы Северного полушария // Экол. Экон. Информ. Сер.: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2021. Т. 6. С. 118–123. DOI: 10.23885/2500-395X-2021-1-6-118-125.

11. Мартынова Ю. В., Крупчатников В. Н., Гочаков А. В., Антохина О. Ю. Связь интенсивности формирования снежного покрова в Западной Сибири с особенностями динамики атмосферы Северного полушария в осенне-зимний сезон // Материалы Междунар. конф. и школы молодых ученых по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде "СITES-2021", Москва, 22–27 нояб. 2021 г. С. 51–53.

12. Рапута В. Ф., Амикишиева Р. А., Ярославцева Т. В. Анализ выносов ртути с промплощадки "Усольехимпрома" // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 4. № 1. С. 193–198. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-193-198.

13. Тарханова М. А. Влияние повышенного стока арктических рек на изменение гидрологических характеристик прилегающих акваторий Северного Ледовитого океана // Комплексные исследования Мирового океана : Материалы 6-й Всерос. науч. конф. молодых ученых, Москва, 18–24 апреля 2021 г. М.: Ин-т океанологии им. П. П. Ширшова РАН, 2021. С. 198–199.

14. Тарханова М. А., Голубева Е. Н. Изменение гидрологических характеристик Северного Ледовитого океана под влиянием увеличивающегося речного стока // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 4, № 1. С. 145–151. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-210-216.

### **Свидетельства о регистрации в Роспатенте**

1. Свидетельство № 2021620907 РФ. База данных по содержанию пыли, рН, макро- и микроэлементов в снежном покрове в районе Искитимского цементного завода, Новосибирская область. : св-во об официальной регистрации программы для ЭВМ / Рапута В. Ф., Шуваева О. В., Коковкин В. В., Новикова И. И., Щербатов А. Ф., Михеев В. Н., Ярославцева Т. В., Крайнева М. В.; зарегистр. 14.05.2021.

### **Участие в конференциях и совещаниях**

1. "Focus Siberian Permafrost – Terrestrial Cryosphere and Climate Change", Universität Hamburg, March 24–25, 2021 – 2 доклада (Малахова В. В.).

2. The EGU General Assembly 2021, 19–30 апреля 2021 г., Вена (Австрия) – 1 доклад (Тарханова М. А., Голубева Е. Н.).

3. 17-я Международная выставка и научный конгресс "Электронное геопространство на службе общества" в рамках Международной выставки "Интерэкспо Гео-Сибирь 2021", Новосибирск, 19–21 мая 2021 г. – 10 докладов (Малахова В. В., Тарханова М. А., Голубева Е. Н., Якшина Д. Ф., Рапута В. Ф., Леженин А. А., Ярославцева Т. В., Амикишиева Р. А., Крылова А. И., Платов Г. А., Градов В. С., Боровко И. В., Крупчатников В. Н.).

4. 17-я Международная научно-техническая конференция "Современные методы и средства океанологических исследований" (МСОИ-2021), Москва, 18–20 мая 2021 – 1 доклад (Малахова В. В.).



5. 27-й Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Москва, 5–9 июля 2021 г. – 8 докладов (Рапута В. Ф., Леженин А. А., Амикишиева Р. А., Малахова В. В., Голубева Е. Н., Боровко И. В., Крупчатников В. Н., Платов Г. А., Градов В. С., Крылова А. И.).

6. 14-е Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу, Томск, 19–22 октября 2021 г. – 2 доклада (Малахова В. В.).

8. 10-я Международная научно-практическая конференция "Морские исследования и образование: MARESEDU-2021", Москва, 25–29 октября 2021 г. – 2 доклада (Малахова В. В., Крайнева М. В.).

9. 19-я Всероссийская конференция-школа молодых исследователей "Современные проблемы математического моделирования", пос. Дюрсо Краснодарского кр., 13–18 сентября 2021 г. – 2 доклада (Якшина Д. Ф., Голубева Е. Н., Крайнева М. В., Малахова В. В.).

10. 9-я Всероссийская конференция "Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем (САМЭС) под эгидой объединенной конференции "Экология. Экономика. Информатика", пос. Дюрсо Краснодарского кр., 6–11 сентября 2021 г. – 2 доклада (Малахова В. В., Крупчатников В. Н.).

11. Всероссийская научно-практическая конференция "Комплексное изучение и освоения недр Европейского Севера России", Ухта, 16–17 сентября 2021 г. – 1 доклад (Малахова В. В.).

12. "Ломоносовские чтения", секция "Геология", Москва, 20–29 апреля 2021 г. – 1 доклад (Малахова В. В.).

13. 5-я юбилейная всероссийская конференции "Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития", Санкт-Петербург, 14–15 декабря 2021 г. – 2 доклада (Малахова В. В., Голубева Е. Н.).

14. 6-я Всероссийская научная конференция молодых ученых "Комплексные исследования Мирового океана" (КИМО-2021), Москва, 18–24 апреля 2021 г. – 1 доклад (Тарханова М. А.).

15. Marchuk Scientific Readings-2021, Novosibirsk, October 4–8, 2021 – 7 докладов, из них 2 приглашенных (Платов Г. А., Градов В. С., Боровко И. В., Крупчатников В. Н., Рапута В. Ф., Леженин А. А., Амикишиева Р. А., Ярославцева Т. В., Крылова А. И., Голубева Е. Н., Крайнева М. В., Якшина Д. Ф.)

16. 13-я Международная молодежная научная школа-конференция "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 12–22 апреля 2021 г. – 4 доклада, из них 2 пленарных (Рапута В. Ф., Леженин А. А.).

17. Всероссийская конференция с международным участием "Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2021)", Новосибирск, 24–27 августа 2021 г. – 3 доклада (Рапута В. Ф., Леженин А. А., Амикишиева Р. А.).

18. 6-я Международная конференция "Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека", Томск, 20–24 сентября 2021 г. – 2 доклада (Рапута В. Ф., Ярославцева Т. В.).

19. Научно-практическая конференция по проблемам гидрометеорологических прогнозов, экологии, климата Сибири к 50-летию образования СибНИГМИ, Новосибирск, 20–22 октября 2021 г. – 5 докладов, из них 2 пленарных (Рапута В. Ф., Леженин А. А., Крупчатников В. Н., Платов Г. А., Градов В. С., Боровко И. В.).

20. 28-я Рабочая группа "Аэрозоли Сибири", Томск, 23–26 ноября 2021 г. – 6 докладов (Рапута В. Ф., Леженин А. А., Амикишиева Р. А., Боровко И. В., Крупчатников В. Н., Градов В. С., Крылова А. И.).

21. 37-я Международная конференция "Ляпуновские чтения-2021", Иркутск, 6–9 декабря 2021 г. – 1 доклад (Рапута В. Ф.).

22. 3-я конференция "Проекты, поддержанные Правительством Новосибирской области и Российским фондом фундаментальных исследований, для экономики региона", Новосибирск, 23 декабря 2021 г. – 1 доклад (Рапута В. Ф.).

23. Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде, посвященные памяти чл.-корр. РАН В. Н. Лыкова, CITES '2021, Москва, 22–27 ноября 2021 г. – 2 доклада (Платов Г. А., Градов В. С., Боровко И. В., Крупчатников В. Н.).

24. Евразийская конференция по прикладной математике, Новосибирск, 16–21 декабря 2021 г. – 1 пленарный доклад (Платов Г. А.).

### **Участие в оргкомитетах конференций**

1. Платов Г. А.:

– член оргкомитета конференции "Электронное геопространство на службе общества" в рамках 17-й Международной выставки и научного конгресса "Интерэкспо Гео-Сибирь 2021", Новосибирск, 19–21 мая 2021 г.,

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.,

– член программного комитета конференции "Евразийская конференция по прикладной математике", Новосибирск, 16–21 декабря 2021 г.;

2. Крупчатников В. Н. – член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.;

3. Леженин А. А.:

– член оргкомитета конференции "Электронное геопространство на службе общества" в рамках 17-й Международной выставки и научного конгресса "Интерэкспо Гео-Сибирь 2021", Новосибирск, 19–21 мая 2021 г.,

– член программного комитета научно-практической конференции по проблемам гидрометеорологических прогнозов, экологии, климата Сибири, посвящ. 50-летию образования СибНИГМИ, Новосибирск, 20–22 октября 2021 г.,

4. Крайнева М. В. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.

### **Итоговые данные по лаборатории**

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 13

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 17

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 31

Свидетельств о регистрации программ в Роспатенте – 1

Докладов на конференциях – 62 в том числе 7 пленарных

Участников оргкомитетов конференций – 7

### Кадровый состав

1. Платов Г. А.	зав. лабораторией	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. Градова М. А.	инженер	
6. Градов В. С.	инженер	
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.	
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.	– доцент НГУ
Крупчатников В. Н.	– доцент НГУ
Леженин А. А.	– доцент СИУ – филиала РАНХиГС при Президенте РФ
Платов Г. А.	– доцент НГУ
Рапута В. Ф.	– старший преподаватель НГУ
Ярославцева Т. В.	– доцент ВКИ НГУ

### Руководство аспирантами

Градов В. С.	– 2-й год, НГУ, руководитель Платов Г. А.
Градова М. А.	– 2-й год, ИВМиМГ СО РАН, руководитель Голубева Е. Н.

### Защита дипломов

Наконечный О. М.	– программист ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.
Бреславец О. Д.	– программист ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.
Глинский К. А.	– программист ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.
Гостев К. А.	– программист ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.
Красковский А. А.	– программист ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.
Сауткин А. М.	– программист ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.
Соколов В. Р.	– программист ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.

### Награды

Градов В. С. – стипендия мэрии города Новосибирска аспирантам за научную, творческую и инновационную деятельность.