



Школа-семинар

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ
ДИСТАНЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
И ПРОГНОЗА ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ
В АРКТИКЕ**

**ПРОГРАММА
ТЕЗИСЫ**

**12–14 октября 2015 года
Таруса**

Школа-семинар Современные методы дистанционных исследований и прогноза параметров среды в Арктике

Таруса, 12–14 октября 2015 года

Организаторы:

Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН),
отдел исследования Земли из космоса
Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
(Гидрометцентр России), лаборатория гидрометеорологии Арктики
Институт физики атмосферы Российской академии наук (ИФА РАН)

При участии:

Российский научный фонд (РНФ), проект № 14-37-00053
Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ), проект № 15-05-20788

ПРОГРАММА

12 октября 2015 года, понедельник

- 11:00** Отъезд участников от ИКИ РАН
- 14:00–16:30** Прибытие участников, размещение, обед, ознакомление с достопримечательностями Тарусы
- 16:30–17:00** Открытие Школы-семинара.
Организационные вопросы.

Вступительное слово:

Шарков Е. А. заведующий отделом исследования Земли из космоса
ИКИ РАН

Иванов В. В. заведующий лабораторией гидрометеорологии Арктики
Гидрометцентра России.

Сессия № 1. 17:30–19:30. Председатель — *Иванов В. В.*

- 17:00–17:30** *Репина И. А.* (ИФА РАН, ИКИ РАН) Исследование теплообмена в Арктике по данным экспериментов, реанализов и спутниковых наблюдений
- 17:30–18:15** *Юрганов Л. Н.* (Университет Мериленда) Перспективы спутникового мониторинга атмосферного метана в Российской Арктике
- 18:15–18:45** *Ибраев Р. А.* (ИВМ РАН, Гидрометцентр России) Модель Северного Ледовитого океана: постановка, технология, результаты

13 октября 2015 года, вторник

Сессия № 2. 10:00–13:00. Председатель — Гройсман П. Я.

- 10:00–10:45** *Гройсман П. Я.* (UCAR, NOAA) Изменения гидрологического цикла в высоких широтах Северной Евразии в связи с экстремальными погодными явлениями
- 10:45 – 11:15** *Алексеев В. А.* (IARC) Потепление Северной Атлантики, конвекция в Северных морях и связь с климатическими изменениями в Арктике
- 11:15–11:30** *Байбурин Р.* (ИВМ РАН) Состояние совместной модели мирового океана ИВМ-ИО и модели морского льда CICE высокого пространственного разрешения
- 11:30–11:45** *Перерыв на чай-кофе*
- 11:45–12:00** *Алферов Д. Ю., Астахова Е. Д.* (Гидрометцентр России) Система ансамблевого мезомасштабного прогноза погоды высокого разрешения для Арктических территорий: начало работы
- 12:00–12:15** *Киктев Д. Б., Круглова Е. Н., Куликова И. А.* (Гидрометцентр России) Взаимосвязь температуры воздуха и осадков в Арктике с крупномасштабными модами атмосферной изменчивости
- 12:15–12:30** *Матвеева Т. А., Кислов А. В.* (МГУ) Экстремумы скорости ветра европейского сектора Арктики
- 12:30–12:45** *Калмыков В. В., Ибраев Р. А., Дьяконов Г. С.* (ИО РАН, Гидрометцентр России) CMF – фреймворк для модели земной системы высокого разрешения.
- 12:45–13:00** *Кауркин М. Н., Ибраев Р. А.* (ИВМ РАН) Разработка технологии усвоения данных наблюдений на основе ансамблевых фильтров Калмана в модель океана сверхвысокого пространственного разрешения для массивно-параллельных вычислительных систем

Сессия № 3. 15:00–19:00. Председатель — Шарков Е. А.

- 15:00–15:30** *Раев М. Д., Шарков Е. А.* и др. (ИКИ РАН) Многолетние научные базы данных реанализа спутниковых радиотепловых систем
- 15:30–16:00** *Шарков Е. А., Раев М. Д., Тихонов В. В., Репина И. А., Комарова Н. Ю.* (ИКИ РАН) Временная эволюция Арктического ледового покрова в режиме нелинейной регрессии по данным микроволнового спутникового зондирования
- 16:00–16:30** *Кузьмин А. В.* (ИКИ РАН) Современные спутниковые радиотепловые миссии

- 16:30–17:00** *Тихонов В. В., Репина И. А., Раев М. Д., Шарков Е. А., Боярский Д. А., Алексеева Т. А., Иванов В. В., Комарова Н. Ю.* (ИКИ РАН, ААНИИ, ИФА РАН) Новый алгоритм определения сплочённости морского льда полярных регионов по данным спутниковой микроволновой радиометрии
- 17:00–17:15** *Перерыв на чай-кофе*
- 17:15–17:45** *Ермаков Д. М., Шарков Е. Е., Чернушич А. П.* (ФирЭ, ИКИ РАН) Расчёт потоков влаги и скрытого тепла при исследовании атмосферных мезомасштабных и синоптических процессов с помощью спутникового радиотепловидения
- 17:45–18:15** *Лебедев С. А.* (ГЦ РАН, ИКИ РАН) Спутниковая альтиметрия Белого и Баренцева морей
- 18:15–18:30** *Максимов А. А.* (НИЦ «Планета») Использование спутниковой информации для мониторинга ледовой обстановки и опасных ледовых явлений
- 18:30–18:45** *Хавина Е. М., Репина И. А.* (МФТИ, ИФА РАН) Влияние положения кромки морского льда в Арктике на температурную структуру атмосферного пограничного слоя

14 октября 2015 года, среда

Сессия № 4. 10:00–13:00. Председатель — Ибраев Р. А.

- 10:00–10:45** *Дианский Н. А., Фомин В. В., Гусев А. В., Кабатченко И. М.* (ИВМ РАН, ГОИН) Моделирование циркуляции Западно-арктических морей РФ на основе современных технологий численного моделирования и оценка водообмена через Карские ворота
- 10:45–11:30** *Хан В. М., Цепелев В. Ю., Мартазинова В. Ф.* (Гидрометцентр) Комплексования синоптико-статистических и гидродинамических прогностических систем
- 11:30–11:45** *Перерыв на чай-кофе*
- 11:45–12:00** *Даньшина А. В., Иванов В. В.* Преимущества модели NEMO при исследовании режима морей Арктики (ААНИИ)
- 12:00–12:15** *Блошкина Е. В., Волков Д. Л., Колдунов Н. В., Махотин М. С.* (ААНИИ) Сравнение распределения термохалинных характеристик по результатам расчета модели MITGSM и наблюдений в Северном Ледовитом океане
- 12:15–12:30** *Смирнов А. В., Кораблев А. А., Вязилова А. Е.* (ААНИИ) Эволюция климата морей Северо-Европейского бассейна с конца XX века по настоящее время

- 12:30–12:45** *Ушаков К. В.* (Гидрометцентр России) Моделирование межгодовой изменчивости циркуляции вод Северного Ледовитого океана по атмосферным данным CORE-II
- 12:45–13:00** *Мизяк В. Г., Шляева А. В., Рогутов В. С., Толстых М. А.* (Гидрометцентр России) Использование данных полярноорбитальных спутниковых наблюдений AMV в системе усвоения на основе LETKF
- 13:00–13:15** *Рогутов В. С., Толстых М. А., Мизяк В. Г., Шляева А. Ю.* (Гидрометцентр России) Использование наблюдений скаттерометрами ASCAT ветра на уровне моря в системе усвоения данных на основе локального ансамблевого фильтра Калмана.

Сессия № 5. 15:00–16:30. Председатель — Алексеев В. А.

- 15:00–15:30** *Эзуа И. Н., Толстых М. А., Красюк Т. В.* (Нансен-центр, Гидрометцентр России) Влияние толщины пограничного слоя на систематическую ошибку краткосрочного прогноза
- 15:30–15:45** *Вареников М. В.* (МГУ, ИФА РАН) Изучение полярных мезоциклонов Северного Ледовитого океана по данным дистанционного зондирования, реанализов и численного моделирования
- 15:45–16:00** *Никитин М. А.* (Гидрометцентр России) Использование прогностической системы COSMO-RU для исследования полярных циклонов
- 16:00–16:15** *Кузьмина Е. В., Розинкина И. А., Чумаков М. М.* Технология подготовки начальных данных по водному эквиваленту и плотности снега для моделей атмосферы (на примере COSMO-Ru)
- 16:15–16:30** *Кирсанов А. А., Бундель А. Ю., Никитин М. А., Блинов Д. В., Ривин Г. С., Розинкина И. А.* (Гидрометцентр России) Верификация системы COSMO-RU в Арктическом регионе
- 16:30** **Закрытие школы семинара**
- 17:00** **Отъезд из Тарусы**

ТЕЗИСЫ

ПОТЕПЛЕНИЕ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ, КОНВЕКЦИЯ В СЕВЕРНЫХ МОРЯХ И ИХ СВЯЗЬ С КЛИМАТИЧЕСКИМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ В АРКТИКЕ

*В. А. Алексеев*¹, *В. В. Иванов*^{1,2}, *И. А. Репина*^{3,4}, *О. Ю. Лаврова*⁴, *С. В. Станичный*⁵

¹ Международный центр арктических исследований, Университет Аляски в Фэйрбенксе, США

² Арктический и Антарктический научно исследовательский институт, Санкт-Петербург

³ Институт физики атмосферы имени А. Н. Обухова РАН, Москва

⁴ Институт космических исследований РАН, Москва

⁵ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

Современное потепление в Северной Атлантике является одной из самых важных особенностей климата Северного полушария. Поступление тёплых атлантических вод может быть одной из причин уменьшения площади ледяного покрова в Арктике в зимний период. Уменьшение льда и увеличение площади открытой воды приводит к изменению атмосферной циркуляции и переносу энергии в Арктику. Анализ этих изменений с использованием реанализа NCEP/NCAR показал, что наблюдаемое в настоящее время уменьшение льда в северных морях и соответствующее увеличение площади открытой воды в холодный сезон вокруг Шпицбергена, Земли Франца Иосифа и Новой земли вносят значительный вклад в увеличение потока приходящей длинноволновой радиации по всей Арктике. Наряду с другими изменениями в приземном энергетическом балансе, это увеличение с 1960 г. по настоящее время оценивается примерно в 10 Вт/м², что больше чем радиационный форсинг при удвоении концентрации углекислого газа в атмосфере.

В докладе также обсуждается возможность диагностики глубокой конвекции в Лофотенской котловине Норвежского моря по вихревым структурам, определяемым из спутниковых данных. Глубокая конвекция является важнейшим фактором, определяющим тепловой бюджет Атлантических вод в Северном Ледовитом океане. Используются данные спутниковой альтиметрии, спутниковых радиолокационных (РЛ) измерений, данные о температуре морской поверхности со спектрорадиометров MODIS, а также измерения с океанографических буёв Арго. Показано, что идентифицируемые по спутниковым данным вихри соответствуют конвективным процессам в том же районе по данным буёв Арго. Рассматриваются несколько примеров летних и один зимний

вихрь и соответствующие им структуры в океане на период когда буи Арго находились близко к идентифицированным вихрям. При дальнейшем развитии и улучшении данная методика может быть использована для анализа динамики океанических вихрей в районе Лофотенской котловины и, возможно других районах с активной глубокой конвекцией.

СИСТЕМА АНСАМБЛЕВОГО МЕЗОМАСШТАБНОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ АРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ: НАЧАЛО РАБОТЫ

Д. Ю. Алферов, Е. Д. Астахова

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, Москва

В области численного прогнозирования погоды наиболее перспективными направлениями в настоящее время являются применение ансамблевых методов, позволяющих дать вероятностный прогноз наряду с априорной оценкой его качества, а также использование моделей высокого пространственного разрешения, позволяющих удовлетворительно описывать метеорологические процессы в условиях сложного рельефа, контрастов погоды и частых опасных явлений. Ввиду этого, а также ввиду положительного опыта использования ансамбля высокого разрешения для прогноза погоды во время зимних Олимпийских игр 2014 г. в Сочи [Алферов и др., 2014] было решено провести численные эксперименты с аналогичной системой ансамблевого прогнозирования для арктических территорий.

Разрабатываемая система использует мезомасштабную прогностическую модель COSMO-Ru2 [Ривин и др., 2015] с шагом 2,2 км по горизонтали. Для генерации возмущений на первом этапе работы планируется использовать метод стохастического возмущения параметризуемых физических тенденций (SPPT, [Buizza et al., 1999]).

В настоящем докладе будут приведены результаты первых численных экспериментов с использованием разрабатываемой системы ансамблевого прогноза.

[Алферов и др., 2014] *Алферов Д. Ю., Астахова Е. Д., Ривин Г. С., Розинкина И. А.* Разработка системы ансамблевых прогнозов высокого разрешения для региона проведения зимних Олимпийских игр-2014 в Сочи // Тр. Гидрометцентра России. 2014. Вып. 352. С. 5–20.

[Ривин и др., 2015] *Ривин Г. С., Розинкина И. А., Вильфанд Р. М., Алферов Д. Ю., Астахова Е. Д., Блинов Д. В., Бундель А. Ю., Казакова Е. В., Кирсанов А. А., Никитин М. А., Перов В. Л., Суркова Г. В., Ревокатова А. П., Шатунова М. В., Чумаков М. М.* Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного

краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 58–70.

[Buizza et al., 1999] *Buizza R., Miller M., Palmer T.* Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System // Quarterly J. Royal Meteorological Soc. 1999. V. 125. P. 2887–2908.

СОСТОЯНИЕ СОВМЕСТНОЙ МОДЕЛИ МИРОВОГО ОКЕАНА ИВМ-ИО И МОДЕЛИ МОРСКОГО ЛЬДА CICE ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Р. Р. Байбурин

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва

Рассматривается состояние совместной модели мирового океана и морского льда Арктического региона. Модель состоит из глобальной океанической компоненты высокого разрешения, разработанной в ИВМ РАН и ИО РАН, модели морского льда CICE лаборатории Лос-Аламоса и системы ПКСМ для совместного моделирования комплекса океан-лёд-атмосфера-земля на массивно параллельных компьютерных архитектурах. Модель в данный момент разрабатывается в Институте вычислительной математики (ИВМ РАН), Гидрометцентре (ГМЦ) и Институте океанологии им. П. П. Ширшова (ИО РАН). Её целью является воспроизведение межгодовой изменчивости гидродинамики арктического региона. Представлены вычислительные характеристики совместной модели под управлением ПКСМ. Модель распараллелена с применением технологии MPI и в данный момент в состоянии эффективно использовать до 5000 вычислительных ядер. Представлены результаты вычислительного эксперимента по совместному моделированию для тестовой прямоугольной расчётной области с горизонтальным шагом в 10...15 км и крупномасштабной трёхполярной сетки в арктического региона, проанализирована точность воспроизведения законов сохранения и цикл эволюции интегральных характеристик состояний океана и морского льда. Физическая система замкнута искусственной моделью атмосферы, полученной по экспериментальным данным CORE1.

СРАВНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОХАЛИННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАСЧЁТА МОДЕЛИ MITGSM И НАБЛЮДЕНИЙ В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ

Е. В. Блошкина, Д. Л. Волков, Н. В. Колдунов, М. С. Махотин

Арктический и антарктический научно исследовательский институт,
Санкт-Петербург

Рассматриваются результаты расчёты термохалинных характеристик на акватории Северного Ледовитого океана на основе модели Массачусетского технологического института (MITgsm). Было произведено два численных эксперимента для сеток с пространственным разрешением 17 и 4 км. В первом случае были получены среднемесячные поля температуры и солёности за период с 1992 по 2012 г. Во втором эксперименте значения термохалинных характеристик рассчитывались раз в неделю за период с 2000 по 2012 г. Расчёт производился для 50 горизонтов в обоих случаях.

Для оценки полученных результатов использовались данные из базы отдела океанологии Арктического и антарктического института. В итоге было проведено сравнение вертикального распределения термохалинных характеристик для 10 разрезов, выполненных в различных районах Северного Ледовитого океана. Также для оценки результатов численных экспериментов были получены карты распределения основных характеристик атлантических вод в Арктическом бассейне (положение верхней и нижней границ, глубина залегания и температура ядра атлантических вод, теплосодержание). Для Американо-Северного суббассейна был проведён анализ границ распространения и температуры ядра тихоокеанских вод.

По результатам сравнения показано, что модель достаточно хорошо отражает особенности вертикального распределения солёности как в глубоководной части Северного Ледовитого океана, так и в арктических морях в обоих численных экспериментах. Особенности же распределения температуры по вертикали лучше отражены во втором эксперименте (шаг сетки 4 км). Но при этом в первом эксперименте значения ядра атлантических вод ближе к измеренным. Теплосодержание атлантических вод завышено в обоих случаях. В обоих экспериментах достаточно хорошо отражены особенности изменения температуры атлантических вод по мере их продвижения в Арктическом бассейне.

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРНЫХ МЕЗОЦИКЛОНОВ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ, РЕАНАЛИЗОВ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

М. И. Варенцов^{1,2}, *П. С. Веземская*², *А. Баранюк*³, *Е. В. Заболотских*⁴

¹ Институт физики атмосферы РАН, Москва

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва

³ Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, Владивосток

⁴ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Полярные мезоциклоны — интересные и слабо изученные мезомасштабные вихри, развивающиеся над морями в высоких широтах. В силу своих небольших размеров, быстрого периода развития и высокой скорости перемещения, их изучение и прогноз затруднены в условиях редкой наблюдательной сети арктического региона [Zahn, von Storch, 2008]. В условиях продолжающегося потепления климата [IPCC..., 2013] и перспектив интенсификации экономической деятельности и морских перевозок в арктических морях, актуальной является задача адекватного воспроизведения полярных мезоциклонов в численных моделях атмосферы, применяемых как для задач прогноза погоды, так и для оценки ожидаемых региональных климатических изменений.

Данное исследование посвящено исследованию качества воспроизведения полярных мезоциклонов в современных реанализах (NCEP, ERA-Interim и мезомасштабный реанализ ASR — Arctic System Reanalysis), и в численных негидростатических моделях атмосферы COSMO-CLM [Böhm et al., 2006] и WRF [Skamarock et al., 2008], с помощью которых осуществлялась детализация глобальных полей реанализа ERA-Interim на сетку более высокого разрешения, для нескольких случаев наблюдения полярных мезоциклонов в Баренцевом море, Карском море и море Лаптевых. Поля ветра, давления, влагозапаса в облачности, взятые из реанализов и полученные по результатам численных экспериментов с моделями COSMO-CLM и WRF, были сравнены с данными дистанционного зондирования — влагозапасом атмосферы, содержанием облачной капельной влаги и приземным ветром по данным микроволновых радиометров AMSR-E и AMSR-2 (MODIS Aqua), а также полями скорости ветра по данным скатерометра QuickSCAT.

Сравнение показало высокий потенциал использованных региональных моделей для детализации данных реанализов в задачах прогноза и изучения полярных мезоциклонов. На примере модели COSMO-CLM была показана важность использования так называемого «спектрального наджинга» (spectral nudging) в задачах детализации

глобальных полей на длительных (первые месяцы и больше) временных масштабах.

[Zahn, von Storch, 2008] Zahn M., von Storch H. A long-term climatology of North Atlantic polar lows // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35.

[IPCC..., 2013] IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change 2013 (AR5) Rep., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2013.

[Böhm et al., 2006] Böhm U. et al. CLM — the climate version of LM: Brief description and long-term applications // COSMO Newsletter. 2006. V. 6.

[Skamarock et al., 2008] Skamarock W.C. et al. A description of the Advanced Research WRF Ver. 3. NCAR Tech Notes-468+STR. 2008.

ИЗМЕНЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ В СВЯЗИ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМИ ПОГОДНЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ

П. Я. Гройсман^{1,2}, *О. Н. Булыгина*^{3,2}, *А. И. Шикломанов*^{4,2}

¹ UCAR at the NOAA National Climatic Data Center, Asheville, USA

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

³ Всероссийский институт гидрометеорологической информации, Обнинск

⁴ University of New Hampshire, Durham, USA

В докладе представлены данные об изменениях глобальной и региональной температуры воздуха за период массовых инструментальных изменений в Северной Евразии и сопутствующих им изменениях гидрологического цикла высоких широт континента. Все характеристики гидрологического цикла, которые регулярно измерялись в течение последних 50 лет на метеорологических и гидрологических сетях в регионе, будут рассмотрены на предмет их систематических изменений (трендов) и изменчивости.

Особое внимание будет уделено изменениям тех переменных, которые непосредственно влияют на хозяйственную деятельность человека в регионе, вызывая засухи, наводнения, эрозию почвы, и нарушения ожидаемого хода сезонного цикла (такие как зимние оттепели, несвоевременный сход снежного покрова, раннее половодье и изменение распределения режима осадков). Для Российской Федерации, Беларуси, и Арктики все результаты будут представлены до 2014 г. включительно. Отдельно будут представлены данные об изменении снежного покрова Северной Евразии за последние десятилетия, полученные по спутникам NOAA и NASA и проведено их сравнение с результатами наземной сети метеорологических наблюдений.

Доказательства того, что наблюдаемые региональные изменения (или их часть) «вызваны» глобальными процессами находятся за

пределом тематики данной лекции. Объяснение причин — вопрос для климатических моделей. Однако только тогда, когда эти модели могут (смогут) непротиворечиво описать ту реализацию регионального климатического процесса, который мы наблюдаем и задокументировали для периода инструментальных наблюдений, есть надежда, что их прогнозы могут быть использованы и для будущего.

ПРЕИМУЩЕСТВА МОДЕЛИ NEMO ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ РЕЖИМА МОРЕЙ АРКТИКИ

А. В. Даньшина, В. В. Иванов

Арктический и антарктический научно исследовательский институт,
Санкт-Петербург

На сегодняшний день модельный комплекс NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean), получивший статус литерной европейской модели, является одной из наиболее перспективных моделей, рекомендованной для использования в странах ЕС для задач оперативной океанографии и климатических исследований. Для изучения термодинамических процессов и ледового режима Арктического региона данный комплекс удобен по ряду причин, одной из которых является возможность перехода внутри NEMO от расчёта глобальной динамики к проведению региональных расчётов циркуляции вод и льдов в Северном Ледовитом океане (СЛО). Опция «телескопизации», в том числе и возможность использования множественной «телескопизации», позволяет использовать дочерние сетки с большим пространственным разрешением, для более детального исследования конкретного района Мирового океана с привлечением граничных условий из глобальной модели за счёт обеспечения прямого и обратного информационных потоков. В отличие от таких моделей как MOM, OCCAM, POP, использующих в расчётах по вертикали z -координату, или таких как POM, ROMS с σ -координатой по вертикали, или HYCOM с гибридной вертикальной координатой, модель NEMO даёт большую манёвренность, предоставляя право выбора между тремя способами задания вертикальной координаты расчётной сетки. К наиболее значимым преимуществам пакета NEMO можно отнести возможность использовать как декартову, так и триполярную криволинейную расчётную сетку, различные современные варианты параметризации подсеточных процессов, сопрягать океанскую модель с моделями других сред и распараллеливать расчётный процесс. Кроме того высокая модульность NEMO позволяет создавать собственные конфигурации под свои задачи за счёт задания различных «ключей» при компиляции. Такие особенности пакета NEMO делают

его привлекательным и для исследования Арктических районов, в том числе и шельфовых зон, требующих более дискретных сеток, для описания процессов малых пространственных масштабов.

Для запуска региональных конфигураций Арктического и северо-европейского бассейна на кластере ААНИИ с возможностью проводить расчёты в режиме телескопизации были построены дочерние криволинейные сетки из глобальной родительской сетки ORCA размером 182×149 расчётных узлов с двухградусным разрешением. Так, для района, охватывающего Лофотенскую и Гренландскую котловины, была построена дочерняя сетка с полуградусным разрешением размером 184×128 расчётных узлов, и 31 уровнем по вертикали. Форсинги на границах дочерней сетки брались из глобальной модели. В качестве атмосферных форсингов использовались данные реанализа с пересчётом потоков по формулам CORE. В данной конфигурации модель динамики и термодинамики ОРА была объединена с моделью морского льда LIM2, входящих в состав пакета NEMO. При задании шага по времени 720 с в глобальной модели, а на дочерней сетки — 360 с, распараллеливание расчётного процесса даже на 30 потоков дало оптимизацию временных затрат в несколько раз по сравнению со временем расчёта без опции распараллеливания. Даже при таких условиях расчёт модельного года производился за 30 ч.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ ЗАПАДНО-АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РФ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОЦЕНКА ВОДООБМЕНА ЧЕРЕЗ ПРОЛИВ КАРСКИЕ ВОРОТА

Н. А. Дианский^{1,2}, В. В. Фомин², А. В. Гусев¹, И. М. Кабатченко²

¹ Институт вычислительной математики РАН, Москва

² Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова, Москва

Представлена система моделирования гидрометеорологических характеристик в морских акваториях, реализованная в Государственном океанографическом институте им. Н. Н. Зубова (ГОИН). Она включает в себя расчёт атмосферного воздействия по модели WRF (Weather Research and Forecasting model), расчёт течений, уровня, температуры, солёности моря и морского льда по модели INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) и расчёт параметров волнения по российской атмосферно-волновой модели (РАВМ). При этом в моделях INMOM и РАВМ имеется возможность использования сгущающихся сеток для более точного расчёта циркуляции и ветрового волнения в вы-

деленных районах. Эта система реализована для различных акваторий: западно-арктических морей побережья России, а также Чёрного, Азовского и Каспийского морей. Разработанная система используется как для оперативных расчётов морской циркуляции (анализ и прогноз), так и для ретроспективных расчётов на несколько десятилетий для определения гидрометеорологических режимных характеристик. Верификация и настройка параметров используемых моделей по данным измерений проводится, в том числе, по данным морских экспедиционных исследований, выполняемых в ГОИН. Представлены результаты расчётов гидрометеорологических полей и их сравнение с данными наблюдений для западно-арктических морей побережья России. Проведённые ретроспективные расчёты циркуляции западно-арктических морей побережья России (Баренцево, Белое, Печорское и Карское моря) за период с 1994 по 2013 г. позволили выявить важные особенности циркуляции вод Баренцева, Карского и Печорского морей, а также рассчитать изменчивость водообмена через пролив Карские ворота.

РАСЧЁТ ПОТОКОВ ВЛАГИ И СКРЫТОГО ТЕПЛА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ АТМОСФЕРНЫХ МЕЗОМАСШТАБНЫХ И СИНОПТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВОГО РАДИОТЕПЛОВИДЕНИЯ

Д. М. Ермаков^{1,2}, Е. Е. Шарков², А. П. Чернушич¹

¹ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники РАН, Москва

² Институт космических исследований РАН, Москва

Спутниковое радиотепловидение — предложенный авторами подход к анализу большого объёма дистанционных спутниковых данных радиотеплового мониторинга Земли (в частности, системы океан-атмосфера) на базе унифицированной замкнутой схемы пространственно-временной интерполяции. Подход позволяет проанализировать динамику наблюдаемых мезо- и крупномасштабных атмосферных процессов в терминах восстанавливаемых полей геофизических параметров (например, интегрального влагосодержания атмосферы) в произвольно заданные моменты времени во всех точках наблюдений, а также векторных полей адвекции (горизонтальных смещений, наблюдаемых в этих полях). Использование совокупности скалярных полей восстановленных геофизических параметров и соответствующих векторных полей адвекции обеспечивает расчёт производных физических значимых характеристик наблюдаемых процессов, таких как потоки влаги и тепла.

В докладе обсуждаются общие принципы и место спутникового радиотепловидения в сравнении с другими концептуально близкими

подходами, а также детали развитой к настоящему времени расчётной схемы. Приводятся оценки точности восстановления геофизических параметров в сопоставлении с известными из мировой литературы результатами. Приводятся иллюстрирующие примеры расчётов по данным длительных серий спутниковых наблюдений. Обсуждаются перспективы дальнейшего развития и практического применения спутникового радиотепловидения.

МОДЕЛЬ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА: ПОСТАНОВКА, ТЕХНОЛОГИЯ, РЕЗУЛЬТАТЫ

Р. А. Ибраев

Гидрометцентр России, Москва

Рассматривается модель циркуляции вод и льда Северного Ледовитого океана (СЛО) высокого пространственного разрешения предназначенная для исследований внутри и межгодовой изменчивости. Совместная модель океан-лёд включает модель динамики океана ИВМИО в трёхполярной системе координат и модель морского льда SICSE. Пространственное разрешение, составляющее 2...5 км, позволяет воспроизводить ряд мезомасштабных явлений. В рассматриваемой постановке модель СЛО включает акваторию Атлантического океана севернее 20° с.ш. и Тихого океана севернее 60° с.ш. Расчётная сетка модели СЛО представляет собой часть расчётной сетки модели Мирового океана с номинальным разрешением 0,1°. Используется атмосферное воздействие COREII.

В работе рассматриваются вычислительные технологии, применяемые в модели СЛО.

Представлены результаты численных экспериментов по воспроизведению внутригодовой изменчивости СЛО. В частности анализируются характеристики переноса водных масс и их сезонная изменчивость.

CMF — ФРЕЙМВОРК ДЛЯ МОДЕЛИ ЗЕМНОЙ СИСТЕМЫ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

В. В. Калмыков, Р. А. Ибраев, Г. С. Дьяконов

Гидрометцентр России, Москва

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва

Представлен оригинальный фреймворк CMF (Compact Modeling Framework), разрабатываемый для совместных моделей земной системы висо-

кого разрешения. Фреймворк позволяет поддерживать отдельные модели (с точки зрения сервисных операций таких, например, сохранение контрольных точек и выполнение MPI-обменов), а также создавать различные комбинации моделей (океан-атмосфера, океан-лёд, океан-атмосфера-лёд и т.д.), которые уже обмениваются физическими данными.

Представлены две версии CMF, отражающие ход наших исследований. Базовая версия CMF 2.0 использует архитектуру с центральным хабом и абстрактным драйвером высокого уровня, оптимизированный алгоритм параллельной интерполяции и параллельную схему ввода/вывода модельных данных. CMF 3.0 заменяет прямой MPI-подход к коммуникациям абстракцией PGAS, а централизованную архитектуру — набором распределённых параллельно работающих сервисов. Для оценки производительности системы представлены тесты на суперкомпьютерах МВС и «Ломоносов». Приведены примеры конфигураций моделей с использованием CMF.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ УСВОЕНИЯ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ОСНОВЕ АНСАМБЛЕВЫХ ФИЛЬТРОВ КАЛМАНА В МОДЕЛЬ ОКЕАНА СВЕРХВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ МАССИВНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

М. Н. Кауркин, Р. А. Ибраев

Институт вычислительной математики РАН, Москва

В работе рассматриваются модель циркуляции океана высокого пространственного разрешения Института вычислительной математики (модель ИВМ-ИО [Ибраев и др., 2012]) работающая с разрешением $0,1^\circ$ по горизонтали и 49 уровней по вертикали по всему глобусу, поэтому для её эффективной работы используется двумерная декомпозиция области и параллельный расчёт на отдельных процессорных ядрах с помощью MPI-технологии (параллелизм до 10 тысяч MPI-процессов). Для выполнения усвоения данных наблюдения и, как следствие, повышения точности даваемого прогноза для данной модели, работающей в таком высоком пространственном разрешении нужен эффективный параллельный алгоритм. В работе приводится пример реализации такого алгоритма на основе ансамблевых фильтров Калмана.

Основное уравнение метода следующее: $\mathbf{x}_a = \mathbf{x}_b + \mathbf{K}(\mathbf{y}_{obs} - \mathbf{H}\mathbf{x}_b)$, $\mathbf{K} = \mathbf{V}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{V}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$. Здесь \mathbf{x}_a , \mathbf{x}_b — векторы модельной величины после и до усвоения (analysis and background) размера N (количество точек модельной сетки $\sim 10^8$, для океана с разрешением $0,1^\circ$);

\mathbf{y} — вектор наблюдений размера M ($\sim 10^3$, количество точек наблюдения); $\mathbf{K}(N \times M)$ — так называемая, весовая матрица (Kalman gain matrix), $\mathbf{B}(N \times N)$, $\mathbf{R}(M \times M)$, диагональная, $\mathbf{H}(M \times N)$ — ковариационная матрица полей модели до усвоения (background covariance matrix), ковариационная матрица ошибок наблюдений и матрица проектирования поля модели в пространство наблюдений, соответственно.

Основная идея метода в том, что ковариационная матрица \mathbf{B} не хранится в явном виде (или аппроксимируется в виде функции), а получается из ансамбля векторов состояния модели (выборки). Пусть $\mathbf{X}_b^K = [\mathbf{x}_b^1 \dots \mathbf{x}_b^K] - [\overline{\mathbf{x}_b^1} \dots \overline{\mathbf{x}_b^K}]$ — матрица размера N на K (количество элементов ансамбля, обычно ~ 100) в столбцах которой векторы состояния модели минус среднее по ансамблю. Тогда матрица ковариации модели, построенная на основании этой выборки: $\mathbf{B}^K = \frac{1}{K-1} \mathbf{X}_b^K (\mathbf{X}_b^K)^T$.

Такой подход численно дороже и технологически сложнее реализуется, чем классическая оптимальная интерполяция [Кауркин и др., 2015], поскольку фактически требует вычисления 100 (по количеству элементов ансамбля) модельных прогнозов, вместо одного, но даёт значительно лучшие результаты, с точки зрения увеличения точности прогнозирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 13-05-01141 и 14-05-00363) и ПФИП РАН «Фундаментальные проблемы математического моделирования».

[Ибраев и др., 2012] Ибраев Р. А., Хабеев Р. Н., Ушаков К. В. Вихререзающая $1/10^\circ$ модель Мирового океана // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 1. С. 37–46.

[Кауркин и др., 2015] Кауркин М. Н., Ибраев Р. А., Беляев К. П. Усвоение данных наблюдений в модели динамики океана высокого пространственного разрешения с применением методов параллельного программирования // Метеорология и гидрология. 2015. (в печати)

ВЗАИМОСВЯЗЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ОСАДКОВ В АРКТИКЕ С КРУПНОМАСШТАБНЫМИ МОДАМИ АТМОСФЕРНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ

Д. Б. Киктев, Е. Н. Круглова, И. А. Куликова

Гидрометцентр России, Москва

В работе рассматриваются особенности температурного режима и осадков в Арктике в рамках концепции глобальных и региональных режимов атмосферной циркуляции. Для идентификации режимов исполь-

зуются климатические индексы. С помощью композитного анализа, на основе которого проводилось картографирование средних значений температуры и осадков для различных фаз индексов, выделяются географические регионы, в которых влияние режимов циркуляции на температуру и осадки является статистически значимым. Приводятся статистические оценки сопряжённости режимов атмосферной циркуляции на северном полушарии. Особое внимание уделено рассмотрению случаев, характеризующихся экстремальными значениями индексов циркуляции, на фоне которых формируются крупные аномалии температуры воздуха и осадков. Продемонстрированы возможности численного моделирования экстремальных ситуаций на месячных и сезонных интервалах времени на базе глобальной полулагранжевой модели SL-AV, развиваемой ИВМ РАН совместно с Гидрометцентром России.

ВЕРИФИКАЦИЯ СИСТЕМЫ COSMO-Ru В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

А. А. Кирсанов, А. Ю. Бундель, М. А. Никитин, Д. В. Блинов, Г. С. Ривин, И. А. Розинкина

Гидрометцентр России, Москва

С использованием VERSUS (стандартного пакета верификации стран-членов консорциума COSMO) получены оценки успешности прогнозов погоды оперативной мезомасштабной негидростатической модели COSMO-Ru для российской Арктики.

Проанализированы сезонные оценки прогнозов COSMO-Ru7 для территории России севернее 64° с. ш. и западнее 80° в. д. с июня 2013 г. по настоящее время.

Межгодовая изменчивость ошибок прогноза температуры воздуха на уровне 2 м проявляется слабо, сильнее всего она выражена весной. В тёплое время года наблюдается общее занижение температуры воздуха с выраженным суточным ходом ошибок (меньшие ошибки приходятся на ночное время). В холодное время года среднеквадратические ошибки прогноза температуры больше, наблюдаются близкие к нулю или положительные средние ошибки, суточный ход ошибок выражен слабее.

Суточный ход ошибок прогноза скорости ветра на уровне 10 м наиболее выражен весной. До зимы 2014-2015 года наблюдались повышенные ошибки прогноза скорости ветра в начальный момент времени. В декабре 2014 г. было включено усвоение данных, что позволило уменьшить эту ошибку.

В настоящее время проводится сравнение прогнозов оперативной COSMO-Ru7 и исследовательской версии модели COSMO-Ru с расширенной к северу областью интегрирования, включающей Северный

полюс. Для оценки влияния различных физических условий используется так называемая условная верификация. В частности, рассчитываются ошибки прогнозов температуры при различных направлениях и скоростях ветра.

СОВРЕМЕННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ РАДИОТЕПЛОВЫЕ МИССИИ: ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ СПУТНИКОВОЙ РАДИОМЕТРИИ

А. В. Кузьмин

Институт космических исследований РАН

Микроволновые радиометрические исследования заняли достойное место в ряду средств дистанционного зондирования Земли из космоса. Без них сегодня не обходится ни один прогноз погоды, ни одно глобальное исследование процессов, происходящих на поверхности Мирового океана и в толще атмосферы. Радиометрические измерения в микроволновом диапазоне обладают высокой информативностью, возможностью получения данных в любое время суток и, практически при любой облачности. Микроволновые радиометры имеют относительно небольшую стоимость, низкие значения энергопотребления и габаритно-весовых характеристик, что позволяет создавать на их основе высокоэффективные многочастотные комплексы, применяемые в глобальных измерениях по всему Земному шару.

Интересно, что исторически первым выходом в космос микроволновой аппаратуры явился запуск в 1962 г. космического корабля *Mariner-2* для исследования структуры и физико-химического состава облачных слоёв Венеры (а именно, поиск водяного пара) при помощи двухчастотной методики, которая станет совершенно стандартной и общепринятой в системе космических зондировщиков атмосферы Земли. Важным шагом этого этапа были создание впервые в СССР многочастотного бортового радиотеплового комплекса и установка его на ИСЗ «Космос-243», который был запущен в 1968 г. Значение этого космического эксперимента состоит в том, что была продемонстрирована принципиальная возможность получения физической и геофизической информации при помощи радиотепловых систем из космоса. Были получены серьёзные научные результаты по соотношению глобального интегрального содержания водяного пара и жидко капельной воды в атмосфере, а также ряд других. Однако при этом стали очевидны ограниченность трассовых измерений в надир.

Создание и запуск на ИСЗ *Nimbus-5* в 1972 г. панорамного сканирующего радиотеплового комплекса *ESMR* на частоте 19,35 ГГц с по-

лосой обзор 3000 км и мгновенным пространственным разрешением 29 км было следующим шагом в развитии микроволнового зондирования. Сканирование осуществлялось поперёк трассы движения аппарата при помощи электронной фазированной решётки. На этом этапе, по существу, произошло формирование и разделение микроволновых систем наблюдения на системы трассового типа, панорамного (или сканерного) типа и измерительные системы (или атмосферные зондировщики).

Важным шагом в микроволновом зондировании было включение поляризационных измерений — на ИСЗ «Метеор» (1974) в трассовом режиме и на ИСЗ Nimbus-6 прибор ESMR (37 ГГц) панорамного типа работал в режиме двух поляризаций. Разработанный многочастотный (пять частот) и двухполяризационный (вертикальная и горизонтальная) панорамный комплекс SMMR был запущен в 1978 г. сразу на двух КА — Nimbus-7 и SEASAT. Если КА SEASAT проработал всего три месяца, то Nimbus-7 успешно функционировал девять лет (до 1988 г.). По данным радиотеплового комплекса SMMR была получена целая серия интересных результатов по исследованию состояния поверхности Мирового океана, снежного и ледового покровов, влажности почв и грунтов. Несомненно, успешное функционирование радиотеплового комплекса SMMR знаменовало собой конец первоначального этапа (1968–1978) и начало современного этапа микроволнового космического зондирования в сантиметровом и миллиметровом диапазонах

Миссия DMSP. Программа DMSP (запуск в 1987 г.), курируемая Министерством обороны США, направлена на исследование задач океанографии и солнечно-земной физики. Каждый из спутников этой серии находится на полярной солнечно-синхронной орбите, пересекает каждую точку поверхности Земли два раза в сутки и обеспечивает полное покрытие поверхности каждые шесть часов. Главной дистанционной системой миссии является микроволновый комплекс — четырёхчастотный и семиканальный сканер SSM/I, работающий на частотах 19,35; 22,235; 37,0 и 85,5 ГГц. Данные используются для получения синоптических карт атмосферных, океанологических параметров и ряда параметров суши, например, поле приповерхностного ветра, покрытие льдом поверхности океанов, осадки над океаном и суши, интегральное водосодержание в атмосфере капельной влаги, влажность почв, покрытие снегом. Дальнейшее развитие эти технологии получили в определённом синтезе прибора сканер-зондировщик SSMIS на борту спутника DMSP F16 и в планах создания приборного комплекса CMIS.

Миссия DMSP продемонстрировала действительно глобальный охват измерениями значительной части Земного шара. Однако, очень важным, как, оказалось, является получение длительных временных рядов данных для оценки, например, климатических или других природных

явлений, имеющих продолжительность, исчисляемую годами, например Эль-Нильо. Такой пример в дистанционном зондировании демонстрирует микроволновые радиотепловые комплексы SSM/I, установленные на спутниках серии DMSP и непрерывно дающие информацию в течение более 18 лет.

Миссия TRMM. Интернациональная (США, Япония и ещё ряд стран) миссия (запуск в 1997 г.) призвана выполнять достаточно специфическую задачу — мониторинг полей осадков в тропической зоне земной атмосферы при помощи синхронно работающих активного (радиолокационного), пассивного (радиотеплового) и оптических сканеров. Для выполнения задач была выбрана низкая орбита (350 км) и наклонение 35°. Пассивный микроволновый сканер TMI, работающий на четырёх частотах и двух поляризациях, совместно с активным радиолокатором обеспечивает первичный набор данных для измерения поля осадков.

Миссии AQUA и ADEOS-II. Космические аппараты рассматриваемых миссий были выведены на орбиты практически одновременно (в 2002 г.) и содержат как основной приборный элемент многочастотный радиотепловой комплекс (AMSR-E на КА AQUA и AMSR на КА ADEOS-II) с очень близкими параметрами. Главной особенностью этого комплекса является введение низкочастотных каналов (до 6,9 ГГц) и повышенная разрешающая способность (до 5 км). Две поляризации принимаются на всех частотных каналах в режиме конического сканирования. Помимо указанного комплекса на КА AQUA установлен 15-канальный микроволновый зондировщик AMSU-A, предназначенный для детального анализа профиля температуры как в нижней тропосфере, так и в стратосфере (до 40 км). В качестве зондировщика профиля водяного пара на этом аппарате установлен четырёхчастотный микроволновый прибор (HSB), при этом один канал настроен на частоту 150 ГГц, а три других канала — на частоты, близкие к 183 ГГц.

Совместный франко-индийский проект MEGHA-TROPQUES целью, которого является разработка нового поколения спутниковых систем для быстрого мониторинга конвективных тропических облачных систем и связанных с ними массо- и энергообмена в тропической зоне. Запуск спутника на низкоширотную орбиту с наклоном 20° и высотой 400 км состоялся в октябре 2011 г. Весь частотный диапазон от 10,6 до 183,3 ГГц поделён между двумя радиометрами: MADRAS со сканированием по конусу, работающим на частотах 10,6(В, Г); 18(В, Г); 23; 36(В, Г); 89(В, Г) и 157(В, Г) ГГц, разрешение 40...6 км в зависимости от частоты, и радиометр SAPHIR, имеющий шесть каналов на частотах 183,31±0,2; ±1,1±2,7; ±4; ±6,6; ±11 ГГц. Для определения профилей водяного пара на шести уровнях (по заверениям разработчиков) используется радиометр SAPHIR, в котором осуществляется линейное сканиро-

вание поперёк направления полёта с максимальным углом отклонения $\pm 50^\circ$ от надира, таким образом, что полоса захвата составляет 1661 км. Разрешение на поверхности в направлении надира составляет 10 км, увеличиваясь в поперечном направлении до 22 км на краях сканирования, размер среднего пиксела составляет 12,3 км.

Радиометр GMI, входящий в проект изучения глобального водяного цикла GPM (Global Precipitation Measurement), представляет собой микроволновой многоканальный радиометр с коническим сканированием. В прибор входит 13 каналов на частотах 10(В, Г), 18(В, Г), 23(В), 36(В, Г), 89(В, Г), 166(В, Г), 183,3+3(В), 183,3+7(В) ГГц. Диаметр зеркальной антенны составляет 1,2 м, угол визирования выбран $48,5^\circ$, при этом угол падения на поверхности — $52,8^\circ$. При секторе сканирования 140° полоса обзора составит 904 км. Наклонение орбиты спутника GPM выбрано 65° при высоте 407 км.

Целый спектр гидрологических задач, а также проблемы мониторинга полей солёности Мирового океана приводят к принципиальной необходимости привлечения микроволновых систем дециметрового диапазона волн, именно там, где собственное излучение земных покровов чувствительно как к содержанию объёмной влаги, так и содержанию солей в растворах (морская вода). Наиболее оптимальным частотным диапазоном, исходя из целого ряда требований, является диапазон 21 см (L-band). Однако при этом возникает серьёзная проблема пространственного разрешения. Для задач указанного типа ESA установило некоторый предел для пространственного разрешения в 30...60 км, в то время как NASA рассчитывает на потенциальное разрешение в 10 км.

Использование спутниковых данных широкой международной кооперации в наше время стало нормой. США, Европа и Япония в тесном сотрудничестве создают измерительные системы для исследования полярных областей, средних широт и экваториальных зон. Важной задачей было и остаётся повышение точности спутниковых наблюдений и определения геофизических параметров.

Применение новых схем радиометрического приёма заставляет искать новые пути повышения чувствительности и методов обработки радиометрического сигнала. Одним из интересных методов в радиометрии в последнее время стал метод оцифровки высокочастотного сигнала для радиометров прямого усиления или сигнала промежуточной частоты для супергетеродинных радиометров до квадратичного детектора. Существующие скоростные АЦП позволяют оцифровывать сигналы в полосе более 3 ГГц. Такой подход оказывается достаточно гибким для дальнейших частотных преобразований на цифровом уровне.

Одной из особенностей радиометрического метода является широкая полоса приема электромагнитного излучения, в этой связи микро-

волновая радиометрия последние годы испытывает постоянное давление со стороны связанных систем различного типа, выражающееся во все повышающемся уровне помех. Причём помехи «продвигаются» в область все более высоких частот. Связные системы на 40 ГГц уже не вызывают удивления. По этой причине приходится делать все более узкополосные радиометры и применять специальные способы фильтрации помех. Оцифровка высокочастотного сигнала и в этом случае позволит улучшить схемы фильтрации помех.

В настоящее время трудно представить изучение процессов, имеющих место в системе океан-атмосфера, без привлечения микроволновой радиометрии как метода дистанционного зондирования. В силу известных особенностей электромагнитного излучения микроволнового диапазона таких, как высокая чувствительность к вариациям физико-химических параметров объектов, их геометрии, значительная проникающая способность, средства исследований в данной части спектра являются одними из самых перспективных и активно развиваемых технологий ДЗЗ.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ НАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ВОДНОМУ ЭКВИВАЛЕНТУ И ПЛОТНОСТИ СНЕГА ДЛЯ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ (НА ПРИМЕРЕ COSMO-Ru)

Е. В. Кузьмина, И. А. Розинкина, М. М. Чумаков

Гидрометцентр России, Москва

Подготовка для атмосферных моделей достоверных начальных данных, в том числе водного эквивалента и плотности снежного покрова, является одной из важнейших задач, решение которой позволяет как получить реалистичные оценки снегозапаса, так и повысить точность прогноза основных метеорологических величин, включая прогнозы характеристик снежного покрова.

В практике международных служб погоды процедура объективного анализа характеристик снежного покрова осуществляется для высоты снега и его фракционного покрытия, поскольку ежедневные измерения проводятся на метеостанциях (высота снега) и с помощью аппаратуры ИСЗ (площадь покрытия снегом). В качестве же начальных данных для моделей атмосферы требуются поля водного эквивалента и плотности снега. Однако эти характеристики снега не измеряются ежедневно и повсеместно. Поэтому начальные данные водного эквивалента получают в системах усвоения данных преобразованием высоты снега через его плотность, которая вычисляется с помощью простых эмпирических

зависимостей. Проведение такого рода расчётов неизбежно приводит к накоплению ошибок в полях водного эквивалента и плотности снега, что влияет на определение потоков тепла в модели. Соответственно, наблюдаются ошибки в прогнозах приземных метеорологических величин, особенно – в температуре воздуха в период таяния снежного покрова.

Так как ежедневные измерения проводятся только для высоты снега, было предложено использовать именно их (а также другие стандартные измерения, проводимые на метеорологических станциях) в качестве входных данных для разработанной многослойной модели снежного покрова (ММСП), которая позволяет рассчитывать водный эквивалент и плотность снега ежедневно и «хранить» их историю в течение всего периода снегозалегания для каждой станции. Анализ данных маршрутов снегомерных съёмок на 31 станции, расположенной на ЕТР, для четырёх снежных сезонов (2009/2010, 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013 гг.) показал, что результаты расчётов водного эквивалента по ММСП удовлетворяют точности начальных данных и значительно (до нескольких раз) точнее соответствующих начальных данных, подготавливаемых для мезомасштабной модели COSMO-Ru.

На основе ММСП в Гидрометцентре России была создана технология подготовки начальных данных плотности и водного эквивалента снега с применением данных ИСЗ высокого разрешения (4 км) для уточнения границы снежного покрова. Данная технология была реализована на примере модели COSMO-Ru и работала в квазиоперативном режиме в течение снежного сезона 2014/2015 гг. Анализ по примерно 800 станциям, расположенным на территории Европейской России, Восточной и Центральной Европы, показал улучшение качества прогноза приземной температуры воздуха вблизи границы снежного покрова (среднеквадратическая ошибка уменьшилась на 0,5...1,5 °С) при использовании предложенной технологии для мезомасштабной модели атмосферы COSMO-Ru. Отмечено влияние изменения начальных полей характеристик снежного покрова на численный прогноз облачности и скорости ветра.

СПУТНИКОВАЯ АЛЬТИМЕТРИЯ БЕЛОГО И БАРЕНЦЕВА МОРЕЙ

С. А. Лебедев

Геофизический центр РАН, Москва
Институт космических исследований РАН, Москва

Баренцево и Белое моря относятся к окраинным морям Северного Ледовитого океана. В настоящее время сложные гидродинамические,

приливные, ледовые и метеорологические режимы этих морей могут быть исследованы с использованием данных дистанционного зондирования, а именно данных спутниковой альтиметрии. Результаты калибровки и верификации спутниковых альтиметрических измерений (высоты морской поверхности и скорости приводного ветра) и сравнение с результатами расчётов высот приливов по региональным моделям показал, что этот тип данных может успешно использоваться в научном исследовании и в решении задач мониторинга окружающей среды. Комплексный анализ приливного режима Баренцева и Белого морей и сравнение высот приливов, рассчитанных по глобальной и региональной приливной моделям, показывает преимущества региональной модели для коррекции данных спутниковой альтиметрии. В докладе приведены примеры использования данных спутниковой альтиметрии для исследования межгодовой изменчивости уровня Баренцева и Белого морей и положения кромки морского льда.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ И ОПАСНЫХ ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ

А. А. Максимов

Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета», Москва

Ледяной покров является одним из наиболее важных факторов, определяющих состояние поверхности моря. Исследование и прогнозирование его параметров представляет не только научный, но и большой практический интерес для морских отраслей экономики. Особенно важно получение точной оперативной информации о состоянии ледовой обстановки для безопасности производственной эксплуатации нефтяных и газовых месторождений на арктическом шельфе и в связи с увеличением перевозок по Северному морскому пути. Наиболее эффективным источником информации о ледяном покрове являются спутниковые данные, роль которых существенно возросла в связи уменьшением авиационных наблюдений за ледовой обстановкой и сокращением сети гидрометеорологических станций в Арктике.

Наибольшую опасность для судов, ледоколов и инженерных сооружений представляют опасные ледовые явления: сжатия льда, интенсивный дрейф, сужение судоходного канала, стамухи, айсберги и др. Именно опасные ледовые явления и образования становятся в большинстве случаев причиной аварий судов и ледоколов в Арктике.

Спутниковые наблюдения позволяют обнаружить и оценить масштаб опасного ледового явления (образования) и своевременно принять меры, для нанесения наименьшего ущерба от этих явлений в различных отраслях хозяйственной деятельности.

Технология оперативного картирования и изучения долговременных характеристик (мониторинга) ледяного покрова по спутниковым данным видимого, инфракрасного и микроволнового диапазонов, обеспечивающая обработку текущей и архивной спутниковой информации, разработана в НИЦ «Планета» в конце 1990-х гг. и реализована совместно с Рязанским ГРУ (многофункциональный программный комплекс PlanetaMeteo). Эта технология довольно долго (с 1998 г.) применяется в оперативном информационном обеспечении о состоянии ледяного покрова на замерзающих морях. Основой её является сочетание автоматизированных и интерактивных процессов обработки информации с ИСЗ. В автоматизированном режиме осуществляется предварительная обработка спутниковых изображений, которая состоит из распаковки, геокодирования, калибровки, визуализации, трансформирования спутниковых данных в картографическую основу и создания многослойного растра. Этап тематической обработки заключается в интерактивном дешифрировании спутниковой информации (оконтуривание выделенных объектов, заливка цветом и штриховкой, нанесение условных обозначений ледовых объектов). По данной технологии ежегодно составляется около 600 ледовых карт по акваториям всех замерзающих морей России. В 2014 г. данная технология была модернизирована, дополнена блоком формирования карт ледовой обстановки в векторном виде и реализована в новой программной среде PlanetaMultiSat». В этой программной среде осуществлена возможность предоставления карт ледовой обстановки потребителю в формате SIGRID-3, который является основным международным средством представления и отображения ледовой информации, согласно требованиям Номенклатуры ВМО. Одной из особенностей программы «PlanetaMultiSat» является возможность конвертирования карты ледовой обстановки, построенной по международной номенклатуре (SIGRID-3) в российскую символику дешифрирования ледовых характеристик.

ЭКСТРЕМУМЫ СКОРОСТИ ВЕТРА ЕВРОПЕЙСКОГО СЕКТОРА АРКТИКИ

Т. А. Матвеева, А. В. Кислов

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Информация об экстремально больших скоростях ветра важна в практических целях — при проектировании и эксплуатации мостов, на морской акватории и побережьях это ещё и портовые сооружения, суда, буровые установки. Исследование особенностей аномалий ветрового режима западной части русской Арктики — наиболее динамично развивающегося заполярного региона России — особенно актуально в современных условиях, поскольку обнаружено, что частота экстремальных явлений возрастает [2-й доклад..., 2014]. Однако нет чёткого представления о причине и характере этих изменений. Продвижение в данном направлении важно в контексте климатического прогноза. Поскольку он основан на использовании данных моделирования, то необходимо оценить потенциальную возможность воспроизведения экстремальных явлений атмосферными моделями. Этой проблеме, а также особенностям ветрового режима европейской части Арктики, посвящена настоящая работа.

Экстремальные скорости ветра у поверхности, в отсутствие особых циркуляций (торнадо, бора и др.), формируются за счёт транспортировки из свободной атмосферы частиц воздуха с большими скоростями. Это короткоживущие аномалии, связанные, однако, с синоптическими процессами. Из статистической теории экстремумов известно, что экстремальные одинаково распределённые независимые случайные величины подчиняются обобщённому распределению вероятностей. Для аппроксимации распределения экстремумов скорости ветра успешно применяется один из его частных случаев — распределение Вейбулла [Palutikof et al., 1999].

Изучение экстремумов скорости ветра по данным стандартных наблюдений в прибрежных регионах Арктики показало, что они представляют собой два набора данных, имеющих различные статистические свойства, но каждый из них подчиняется закону Вейбулла. В соответствии с начинающейся складываться метафорической терминологией [Taleb, 2010], в настоящем исследовании они были обозначены как «лебеди» (самые крупные аномалии этого семейства — так называемые «чёрные лебеди») и «драконы». Именно последние обозначают самые большие аномалии. В модели общей циркуляции атмосферы (INM-CM4.0) и в данных реанализа (20th Century Reanalysis), которые были использованы в настоящей работе, обнаружены только «лебеди» и «чёр-

ные лебеди». Поскольку функция распределения является индикатором общности физического механизма формирования рассматриваемых событий, то можно считать, что не воспроизводится некоторый специальный эффект, ответственный за возникновение аномально больших скоростей ветра.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 14-37-00038.

[2-й доклад..., 2014] Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: Общее резюме. М., 2014. 58 с.

[Palutikof et al., 1999] Palutikof J. P. et al. A review of methods to calculate extreme wind speeds // Meteorological Applications. 1999. V. 6. No. 02. P. 119–132.

[Taleb, 2010] Taleb N. N. The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable Fragility. 2nd Ed. Random House Publishing Group, 2010. 480 p.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ПОЛЯРНООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ AMV В СИСТЕМЕ УСВОЕНИЯ НА ОСНОВЕ LETKF

В. Г. Мизяк¹, А. В. Шляева², В. С. Розутов¹, М. А. Толстых^{1,3}

¹ Гидрометцентр России, Москва

² Канадский метеорологический центр, Монреаль, Канада

³ ИВМ РАН, Москва

Работа посвящена результатам использования спутниковых наблюдений ветра AMV (Atmospheric Motion Vector) в системе усвоения на основе локального ансамблевого фильтра Калмана с преобразованием ансамбля LETKF (Local Ensemble Transform Kalman Filter). Упомянутая система разработана в лаборатории перспективных численных методов Гидрометцентра России. В качестве прогностической модели для получения полей первого приближения используется глобальная оперативная модель атмосферы ПЛАВ (ПолуЛагранжев перенос Абсолютного Вихря). Получаемые с помощью разрабатываемой системы поля анализов будут использоваться в качестве стартовых полей для ансамблевого среднесрочного прогноза в Гидрометцентре России. В настоящее время в усвоении участвуют следующие виды наблюдений: радиозонды TEMP, наземные и корабельные наблюдения SYNOP, SHIP, самолётные наблюдения AIREP, спутниковые наблюдения SATOB, AMV.

Зачастую наблюдения AMV являются единственным источником данных, доступных для арктических широт. Поэтому использование данного вида наблюдений представляется важным для улучшения качества получаемых начальных полей и, как следствие, увеличения точности

модельного прогноза в приполярном регионе. В работе описываются возникающие при усвоении данных наблюдений AMV трудности и результаты работы по их преодолению.

Исследование выполнено в Гидрометцентре России при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-37-00053).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ COSMO-Ru ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЯРНЫХ ЦИКЛОНОВ

М. А. Никитин

Гидрометцентр России, Москва

Характерной особенностью атмосферной циркуляции в Арктике являются полярные циклоны — мезомасштабные барические образования, формирующиеся к северу от полярного фронта. Несмотря на малое время жизни полярных циклонов и их сравнительно небольшой горизонтальный масштаб (от 200 до 500 км), скорость ветра при их прохождении может достигать штормовых значений (свыше 15 м/с). В сочетании с их высокой скоростью перемещения это создаёт угрозу проведению морских операций и эксплуатации объектов прибрежной инфраструктуры.

Полярные циклоны, как правило, могут быть зафиксированы гидрометеорологической наблюдательной сетью только при выходе на побережье, где они быстро заполняются. Поэтому для исследования их эволюции необходимо использовать результаты численного моделирования. В данной работе для изучения полярных циклонов была применена оперативная негидростатическая система прогноза погоды COSMO-Ru, которая является базовой мезомасштабной моделью в прогностических учреждениях Росгидромета.

В ходе работы было проанализировано несколько полярных циклонов, наблюдавшихся в Гренландском, Баренцевом и Карском морях в период 2013–2015 гг. Для расчёта их перемещения применялся метод вложенных сеток: последовательно считались версии модели с шагами сетки 13,2; 6,6 и 2,2 км. Для получения начальных и граничных условий результаты расчётов на крупной сетке интерполировались в узлы сетки с меньшим шагом по пространству. Это позволило дать прогноз зарождения и эволюции полярного циклона, а также получить детальные поля таких метеорологических величин, как скорость ветра, порывы ветра и балл облачности. Для верификации модельных расчётов использовались данные спутниковых снимков и наблюдений на метеорологических станциях. Показано, что при уменьшении шага сетки качество прогноза метеорологических параметров возрастает.

Выполнен сравнительный анализ вертикальных профилей ветра, полученных в результате моделирования, и профилей, рассчитанных по рекомендациям ISO 19901. Результат проведённого сравнения ставит под сомнение применимость стандартизированных методов расчёта порывов ветра, используемых при проведении инженерно-гидрометеорологических изысканий.

Изучено влияние величины сплочённости льда на зарождение и эволюцию полярного циклона. Показано, что при уменьшении сплочённости льда и наличии полыней происходит интенсификация полярного циклона, что приводит к увеличению скорости ветра. При полном отсутствии ледяного покрова траектория перемещения полярного циклона существенно изменяется.

При анализе пространственной структуры полярного циклона было определено, что области, в которых наблюдаются интенсивные восходящие движения воздуха, совпадают с зонами максимального градиента скорости ветра. Исследовано изменение скорости ветра в струйном течении на высоте 300 гПа и в близлежащем полярном циклоне.

МНОГОЛЕТНИЕ НАУЧНЫЕ БАЗЫ ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА СПУТНИКОВЫХ РАДИОТЕПЛОВЫХ СИСТЕМ

М. Д. Раев, Е. А. Шарков

Институт космических исследований РАН, Москва

В работе кратко описана история возникновения и развития в отделе исследования Земли из космоса ИКИ РАН электронной база многолетних данных по измерениям спутниковых микроволновых радиотепловых систем GLOBAL-RT.

Создание базы данных GLOBAL-RT, которое началось в ИКИ РАН в 2002 г., было вызвано необходимостью использования информации о глобальном радиотепловом поле системы океан-атмосфера в задачах многомасштабного исследования климата Земли, в том числе изучения динамики ледовых покровов Арктики и Антарктики, исследования снежных покровов континентов, исследованию стохастических режимов полярного переноса в атмосфере планеты и глобального тропического циклогенеза. Существующие спутниковые микроволновые комплексы, в силу орбитальных и тактико-технических характеристик своих носителей, не в полной мере обеспечивают достаточной регулярности и плотности покрытия земной поверхности исходными данными для формирования глобального поля с временной последовательностью («лакуны»), необходимой для выявления высокодинамичных

и интенсивных атмосферных процессов типа тропических циклонов (ТЦ) или глобальных полей водяного пара. На первом этапе построения глобального радиотеплового поля были использованы данные многоканальных радиометрических приборов SSM/I, установленных на космических аппаратах F10-F15 миссии DMSP, что обеспечивали построение методом дополнения глобальные радиотепловые поля (два поля в сутки). Однако изучение сложных процессов, таких как генезис ТЦ Katrina (2005), показало, что полученный темп формирования глобальных полей крайне недостаточен, и что требуется разработка специализированных методик (типа высокоскоростной анимации), которые будут пригодны для научного анализа вклада высокодинамичных атмосферных процессов (по существу, процедуры реанализа). В настоящий вариант базы данных включены многолетние данные космических многоканальных радиотепловых комплексов систем из космических программ DMSP, GCOM-W1 и AQUA. Созданная база данных содержит как исходную («сырую») информацию с 1987 по 2015 г. (за период 29 лет) многоканальных радиотепловых комплексов SSM/I, SSMIS, AMSR2, AMSRE с общим объёмом информации около 4 ТБ, так предварительно подготовленную и частично обработанную информацию для конкретных задач. С этой целью было разработано специальное программное обеспечение по синтезу глобальных радиотепловых полей, построения карт ледовых покрытий с использованием как стандартных, широко известных алгоритмов (например, NASA Team), так и вновь предложенных и разрабатываемых в ИКИ РАН новых алгоритмов.

Представлены ближайшие перспективы развития созданной базы данных.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОБМЕНА В АРКТИКЕ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, РЕАНАЛИЗОВ И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

И. А. Репина^{1,2}, В. А. Алексеев³, А. А. Аниферов¹, А. Ю. Артамонов¹, М. И. Варенцов^{1,4}, А. Ю. Мазилкина¹

¹ Институт физики атмосферы РАН, Москва

² Институт космических исследований РАН, Москва

³ Международный центр Арктических исследований в Университете Аляски, Фэйрбенкс, США

⁴ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Адекватное описание физических процессов и механизмов, определяющих структуру взаимодействующих пограничных слоёв атмосферы и океана, составляет теоретическую основу для разработки схем их параметризации в моделях совместной крупномасштабной циркуляции

этих сред. При изучении теплового баланса Арктики, особенно в случае полыней, разводий и молодых льдов, окружённых многолетним ледяным полем, особую трудность представляет определение вертикальных турбулентных потоков тепла и влаги. Механизм энергообмена между атмосферой и подстилающей поверхностью в Арктическом бассейне очень сложен, поскольку эта подстилающая поверхность обладает сложной структурой. Здесь присутствуют льды различной толщины, покрытые торосами, снежницами, гладкие и со снежным покровом; полыньи и разломы различной протяжённости; большие участки открытой воды во взволнованном состоянии. Обменные процессы оказываются зависимыми от сплочённости, толщины льда, степени его заснеженности и восторошенности, направления воздушного потока, площади полыней и трещин, наличия позёмки и многих других часто трудно-формализуемых факторов. Процессы ледообразования, разрушения и переносы льда тесно связаны с термическим и динамическим состоянием атмосферы и моря. Комплексные эксперименты последних лет собрали значительный фактический материал о характеристиках энергообмена в полярных районах. Но до сих пор так и нет ответа на вопрос в чем же причина расхождения модельных и экспериментальных данных в определении турбулентных потоков в полярных районах.

В нашей работе мы опираемся, прежде всего, на результаты пульсационных измерений (eddy-correlation) турбулентных потоков тепла и импульса, проведённые в различных районах Арктики над различными поверхностями. Измерения проводились летом и осенью, в основном, в рамках проекта NABOS (Nansen and Amundsen basins observation system). Рассматриваются данные, полученные над открытой водой, тонким молодым льдом, при наличии разводий и снежниц и в прикромочных зонах. Данные измерений сравниваются с данными основных реанализов (ERAInterim, NCEP/NCAR и ASR) и результатами расчётов потоков по спутниковым данным, представленным в архивах HOAPS и AOFLUX. Модели наиболее адекватно представляют значения потоков тепла и влаги для арктического региона. В реанализах наблюдается недооценка потоков тепла, особенно в прикромочных зонах и в период ледообразования. Ошибки спутниковых архивов связаны с ошибками определения сплочённости льда и температуры подстилающей поверхности при неоднородном ледяном покрове.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАБЛЮДЕНИЙ ВЕТРА НА УРОВНЕ МОРЯ СКАТТЕРОМЕТРАМИ ASCAT В СИСТЕМЕ УСВОЕНИЯ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНОГО АНСАМБЛЕВОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА

В. С. Розутов¹, М. А. Толстых², В. Г. Мизяк¹, А. Ю. Шляева³

¹ Гидрометцентр России, Москва

² Институт вычислительной математики РАН, Москва

³ Канадский метеорологический центр, Монреаль, Канада

В Гидрометцентре России разрабатывается система усвоения данных метеонаблюдений на основе локального ансамблевого фильтра Калмана с преобразованием ансамбля LETKF (Local Ensemble Transform Kalman Filter). В докладе представлено дальнейшее развитие системы усвоения на основе LETKF, а именно, реализация усвоения спутниковых наблюдений приводного ветра, полученных с помощью скаттерометров ASCAT (Advanced SCATterometer).

Скаттерометр — это активный зонд, размещённый на спутнике. Скаттерометры излучают электромагнитную волну и принимают отражённый от поверхности сигнал. Интенсивность рассеянного в обратном направлении от поверхности моря сигнала позволяет определить скорость и направление ветра над поверхностью моря.

Прямые (или контактные) наблюдения в основном сосредоточены на суше. Поэтому, данные скаттерометров особенно важны при усвоении данных над океанами, где количество прямых наблюдений невелико. Хотя наличие льда на поверхности не позволяет скаттерометрам определить скорость ветра, с потеплением климата и сокращением площади полярных льдов эти данные со временем, возможно, будут играть все большую роль при усвоении данных в арктическом регионе.

Было реализовано усвоение данных наблюдений ASCAT с полярноорбитальных спутников METOP-a и METOP-b Европейского космического агентства (горизонтальное разрешение 25 км) в системе усвоения на основе LETKF. Проведены эксперименты по циклическому усвоению данных ASCAT совместно с оперативной версией глобальной полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ с разрешением $0,9 \times 0,72^\circ$ по долготе и широте соответственно, 28 σ -уровней по вертикали. Численные эксперименты показали, что использование спутниковых данных ASCAT в системе усвоения данных наблюдений позволяет уменьшить ошибки прогнозов погоды.

ЭВОЛЮЦИЯ КЛИМАТА МОРЕЙ СЕВЕРО-ЕВРОПЕЙСКОГО БАСЕЙНА С КОНЦА XX ВЕКА ПО НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ

*А. В. Смирнов*¹, *А. А. Кораблев*², *А. Е. Вязилова*¹

¹ ААНИИ, Санкт-Петербург, Россия

² Геофизический институт, Берген, Норвегия

В докладе рассмотрена эволюция океанографических характеристик в Северо-Европейском бассейне (СЕБ) в конце XX — начале XXI столетия, включая межгодовую изменчивость термохалинного состояния вод и процессы, формирующие годовой ход океанографических параметров. Ослабление конвекции с начала 1980-х гг. привело к изменению характеристик Норвежской глубинной водной массы, промежуточных вод и вод перелива. Резко выросла температура глубинных вод, произошло уменьшение плотности. Усиление Североатлантического колебания в атмосферной циркуляции должно было способствовать увеличению притока в СЕБ солёных Атлантических вод (АВ), однако солёность на большей части акватории продолжала снижаться. Периоды с устойчивыми положительными (2002–2014) и отрицательными (1992–1997) аномалиями солёности сопровождались аномалиями температуры такого же знака. Отрицательная аномалия солёности 1992–1997 гг. прошла через стадии с высокой и низкой плотностью, вызванной переходом от низких значений температуры в её ядре, к сильному прогреву 1996–1997 гг. Усиление теплоотдачи океана в конце XX века соответствовало увеличению выноса льда и полярных вод из Арктического бассейна под влиянием усилившихся северных потоков в атмосфере, что подтверждается изменением положения границы ледяного покрова и наблюдениями за температурой воздуха. Несмотря на интенсивное таяние морского льда в Арктике в последнее десятилетие, в СЕБ наблюдается значительное увеличение солёности в верхнем слое АВ, где основной вклад вносит изменение динамики северо-атлантического субполярного круговорота.

НОВЫЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СПЛОЧЁННОСТИ МОРСКОГО ЛЬДА ПОЛЯРНЫХ РЕГИОНОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОМЕТРИИ

*В. В. Тихонов¹, И. А. Репина^{1,2}, М. Д. Раев¹, Е. А. Шарков¹, Д. А. Боярский¹,
Т. А. Алексеева⁴, В. В. Иванов^{3,4}, Н. Ю. Комарова¹*

¹ Институт космических исследований РАН, Москва

² Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва

³ Гидрометцентр России, Москва

⁴ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

В докладе рассматривается новый алгоритм определения сплочённости морского ледяного покрова полярных регионов по данным спутниковой микроволновой радиометрии (VASIA2). Методика построения нового алгоритма коренным образом отличается от методики создания современных алгоритмов. Алгоритм разработан на основе физической модели излучения системы «морская поверхность – ледяной покров – снежный покров – атмосфера». В алгоритме не используются значения связующих точек — фиксированных значений яркостной или физической температуры различных льдов и открытой воды. Все расчётные выражения алгоритма, получены на основе теоретического моделирования. Схема построения алгоритма позволила уменьшить влияние атмосферных изменений на определение сплочённости морского льда. Алгоритм позволяет восстанавливать не только сплочённость морского льда, но и показывать области морского льда, занятые снежниками. В алгоритме не применяются сложные и длительные расчёты, он прост в использовании.

Сравнение карт общей сплочённости ледяного покрова Арктики и Антарктики, полученных по алгоритмам NASA Team 2 и VASIA2 показало их хорошее соответствие. Сравнение сплочённости морского льда Арктики, полученной по алгоритму VASIA2 с данными визуальных судовых измерений, показало высокий коэффициент корреляции, как в летний, так и в зимний периоды.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА ПО АТМОСФЕРНЫМ ДАННЫМ CORE-II

К. В. Ушаков

Гидрометцентр России, Москва

Решение задач освоения арктического региона требует понимания и умения прогнозировать сложные, до сих пор остающиеся слабо исследованными, физические, экологические и другие процессы, происходящие в различных средах, что, в свою очередь, невозможно без применения современных технологий математического моделирования. Сложность описываемых процессов и большой объём данных ставят задачу моделирования изменений климата в ряд самых вычислительно-ёмких в науке. В данной работе с помощью совместной модели океана и морского льда ИВМ-ИО [Ибраев и др., 2012] выполнен численный эксперимент по расчёту циркуляции вод Северного Ледовитого океана и состояния морского льда по протоколу CORE-II [Large, Yeager, 2009]. Его целью является верификация модели и получение с её помощью первых качественных данных о межгодовой изменчивости физических характеристик СЛО во второй половине XX – начале XXI века.

Полная система уравнений трёхмерной динамики океана в приближениях Буссинеска и гидростатики аппроксимирована в модели методом конечных объёмов на сетке типа В. На вертикальной оси используются z-координаты. Описание баротропной динамики выполняется с помощью двумерной системы уравнений мелкой воды. Для вертикального перемешивания используется параметризация Манка-Андерсона. Поверхность раздела воздух-вода – свободная, с явным описанием потоков воды, тепла, соли и импульса по модели пограничного слоя NCAR [Large, Yeager, 2009]. Для описания снежно-ледового покрова используется термодинамическая модель [Schrum, Backhaus, 1999]. За исключением вертикального турбулентного перемешивания, все процессы описаны с помощью явных численных методов. Благодаря этому стало возможным естественное распараллеливание модели с применением метода двумерной декомпозиции области. Расчёты выполнялись на суперкомпьютерах «Ломоносов» (МГУ) и МВС10П (МЦЦ РАН) с использованием до 835 процессорных ядер, при этом модель показала почти линейную масштабируемость.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 14-37-00053) в ФГБУ «Гидрометцентр России».

- [Ибраев и др., 2012] Ибраев Р. А., Хабеев Р. Н., Ушаков К. В. Вихререзрашающая $1/10^\circ$ модель Мирового океана // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 1. С. 45–55.
- [Large, Yeager, 2009] Large W., Yeager S. The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set // Clim. Dyn. 2009. V. 33. No. 2-3. P. 341–364.
- [Schrum, Backhaus, 1999] Schrum C., Backhaus J. 1999. Sensitivity of atmosphere-ocean heat exchange and heat content in North Sea and Baltic Sea: A comparative Assessment // Tellus. 1999. V. 51A. P. 526–549.

ВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ АРКТИЧЕСКОГО ЛЕДОВОГО ПОКРОВА В РЕЖИМЕ НЕЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ ПО ДАННЫМ МИКРОВОЛНОВОГО СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Е. А. Шарков¹, М. Д. Раев¹, В. В. Тихонов¹, И. А. Репина^{1,2}, Н. Ю. Комарова¹

¹ Институт космических исследований РАН, Москва

² Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва

В подавляющем большинстве научных работ, связанных с исследованием стохастической структуры климатологических параметров планеты (в том числе, и площади Арктического ледового покрова), основной парадигмой при обработке информации является концепция так называемого «линейного тренда» при различных пространственно-временных масштабах изучаемого явления. Однако детальное исследование стохастических режимов временной эволюции арктического ледового покрова северной полярной шапки (СПШ) за 1987–2014 гг. с помощью регрессионных моделей высокого порядка (от второго до шестого) позволило получить доказательство признания чисто линейного регрессионного подхода некорректным при анализе стохастической модели временной эволюции ледового покрова СПШ за трёхдекадный временной период. Построение шести вариантов нелинейных аппроксимации полученных по дистанционным данным временных зависимостей величин максимального и минимального покрытия ледовой площади СПШ за указанный период и вычисление регрессионных зависимостей позволила установить, что минимальная среднеквадратичная ошибка отклонения от аппроксимируемой кривой может быть получена для полинома четвертой степени. Таким образом, используемую в большинстве работ модель линейного тренда с отрицательным временным градиентом для минимального значения ледопокpытия за период около 30 лет для СПШ следует признать некорректной, и вопрос о роли площади ледового покpытия СПШ и его стохастического режима в концепции «глобального потепления» остаётся открытым.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТРУКТУРА АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В ПРИКРОМОЧНЫХ ЗОНАХ

Е. М. Хавина^{1,2}, *И. А. Репина*²

¹ Московский физико-технический институт

² Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН

Северная полярная область занимает особое место в современной климатической системе как индикатор происходящих изменений вследствие эффекта полярного усиления. Знаковым проявлением этих изменений является резкое увеличение свободной ото льда площади в Северном Ледовитом океане, произошедшее в начале 2000-х гг. Большая амплитуда наблюдаемых и прогнозируемых изменений климата Арктики, а также существующие недостатки численных моделей климата и прогноза погоды обуславливают актуальность развития последних. С этим связана потребность в исследованиях физических процессов в климатической системе Арктики и, в частности, в атмосферном пограничном слое в прикромочной зоне морского льда. Состояние ледяного покрова во многом определяет тепловое взаимодействие между океаном и атмосферой в полярных регионах. Полярной зимой лёд препятствует теплообмену, но при наличии участков открытой воды (полюней, разводий) из-за большой разницы температур вода-воздух турбулентные потоки тепла возрастают в десятки раз. Наиболее интенсивное взаимодействие атмосферы и океана в Арктике происходит в прикромочных зонах, особенно во время холодных вторжений — режимов натекания холодной воздушной массы на свободную ото льда поверхность океана. Но при этом температурная структура и динамика атмосферного пограничного слоя в этих районах изучена мало. Отдельные измерения проводились с самолётов и с использованием радиозондирования, но они не дают возможность детально исследовать влияния состояния подстилающей поверхности в Северном ледовитом океане на термическую структуру атмосферы. В данной работе используются данные непрерывного зондирования температуры пограничного слоя атмосферы в Арктике, полученные с использованием температурного метеорологического профилимера МТП-5 в осенний период во время научно-исследовательских рейсов в 2013 и 2015 гг. МТП-5 осуществляет дистанционное зондирование атмосферы с использованием микроволнового радиометра до высоты 1000 м с частотой 5 мин. Для описания структуры подстилающей поверхности использовались данные ледовых наблюдений с борта судна. Установлено, что температурная структура атмосферного пограничного слоя существенно изменилась при переходе с открытой воды на лед и со льда на открытую воду. Влияние поверх-

ности прослеживается до высоты около 1 км. Проведено статистическое исследование формирования инверсий над открытой водой и ледяными массивами, а также в переходных зонах. Сравнение данных о положении кромки, полученных во время судовых наблюдений с данными, восстановленными из спутниковых микроволновых измерений показали значительную неопределённость положения кромки льда в зависимости от использованного алгоритма. Это может быть основной причиной неадекватного воспроизведения характеристик атмосферного пограничного слоя в реанализах и моделях в прикромочных зонах. Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 14-37-00053).

КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ СИНОПТИКО-СТАТИСТИЧЕСКИХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В. М. Хан¹, В. Ю. Цепелев², В. Ф. Мартазинова³

- ¹ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва
- ² Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
- ³ Украинский гидрометеорологический институт, Киев, Украина

В настоящем исследовании были проведены эксперименты с целью повышения предсказуемости атмосферных процессов, базирующиеся на комплексировании принципиально отличающихся друг от друга синоптико-статистического и гидродинамического подходов. В схему комплексирования вошли прогнозы, составляемые физико-синоптическим методом ПЛАВАЮЩИЙ АНАЛОГ (УкрГМИ), синоптическим методом ГОМОЛОГОВ ЦИРКУЛЯЦИИ (Северо-Западное УГМС) и численным гидродинамическим методом с использованием модели ПЛАВ (Гидрометцентр России и ИВМ РАН). Отдельно были рассмотрены инерционные прогнозы температуры для той же территории. Технологическая проблема объединения прогнозов была решена с помощью специализированного программного комплекса, позволяющего проводить различные вычислительные эксперименты и сочетать прогнозы в различных комбинациях по любому региону и осуществлять их объективное количественное и качественное оценивание. В ходе испытаний методов прогноза и их комплексирования были сделаны выводы, что каждый из рассмотренных методов прогноза имеет уровень успешности, соответствующий мировому в области долгосрочного прогнозирования. При этом метод ПЛАВАЮЩИЙ АНАЛОГ демонстрирует высокую результативность в тёплый период года. Модель ПЛАВ в среднем, в холодный сезон имеет неплохую оправдываемость. Метод ГОМОЛОГОВ ЦИР-

КУЛЯЦИИ наиболее стабильно прогнозирует крупномасштабные циркуляционные особенности атмосферы и имеет наименьшую амплитуду разброса оценок качества в течение всего года. Для всех изученных методов характерно снижение их качества в зимние месяцы и в период весенней перестройки циркуляции атмосферы. По календарным месяцам года успешные прогнозы распределяются более равномерно, чем неудачные. Положительные аномалии температуры над европейской территорией СНГ прогнозируются успешней, чем отрицательные аномалии. Качество всех рассмотренных методических прогнозов в высокой степени зависит от инерционности макроциркуляционных процессов. Качество прогнозов снижается при резких перестройках полей метеопараметров. Процедура комплексирования прогнозов, составленных по разнородным по своей идеологии методам, в большинстве случаев продемонстрировала свою эффективность.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-37-0053).

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА СИСТЕМАТИЧЕСКУЮ ОШИБКУ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА

И. Н. Эзау¹, М. А. Толстых^{2,3}, Т. В. Красюк³

¹ Центр исследований окружающей среды и дистанционного зондирования Земли им. Ф. Нансена, Берген, Норвегия

² ИВМ РАН, Москва

³ Гидрометцентр России, Москва

В докладе анализируются причины возникновения систематических ошибок прогноза приземной температуры в моделях общей циркуляции атмосферы в зимних условиях. Отмечено, что в отдельных регионах в точках минимума приземной температуры модельные значения сильно отличаются от фактических.

Представлена гипотеза о влиянии толщины пограничного слоя на величину ошибки прогноза минимальной приземной температуры. На основе краткосрочных численных прогнозов погоды с помощью модели атмосферы ПЛАВ за январь 2015 г. выявлено, что максимальная ошибка наблюдается в регионах Евразии с тонким погранслоем. Построены зависимости ошибки дневной амплитуды приземной температуры от ошибки минимальной дневной температуры $\Delta T_{min} = obT_{min} - fcT_{min}$ (ob — данные наблюдений на станциях; fc — прогнозные значения) для двух регионов на территории России. В регионе А (30...55° в.д., 60...80° с.ш.) эффекта не наблюдается, что может быть связано с циклонической активностью, сопровождаемой заметной облачностью.

В регионе В (60...85° в.д., 55...80° с.ш.), где зимой преобладает сибирский антициклон и, следовательно, безоблачная погода, гипотеза подтверждается.

ПЕРСПЕКТИВЫ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНОГО МЕТАНА В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ

Л. Н. Юрганов

Университет Мериленда, Балтимор, США

Процесс потепления Арктики идёт в два раза быстрее, чем потепление климата в остальной части планеты. Общепринятое объяснение этой разницы состоит в наличии положительных обратных связей, хотя исчерпывающей модели не построено. Потепление наблюдается как на суше, так и в морях Северного Ледовитого океана (СЛО). Таяние вечной мерзлоты на суше приводит к росту эмиссии метана, активного парникового газа. Потепление океана может привести к значительному выбросу метана от донных осадков, в том числе от метаногидратов. Активная разработка углеродных месторождений добавляет антропогенные источники метана. По поводу скоростей этих процессов ведутся оживлённые дискуссии, однако конкретные экспериментальные данные очень скудны, а для многих районов СЛО они просто отсутствуют. Потенциальная возможность метановой положительной климатической обратной связи, между тем, никем не подвергается сомнению.

В настоящее время на орбите работает ряд спектральных приборов, включающих также и российский прибор ИКФС-2, измеряющих спектры уходящего излучения в полосах метана, находящихся в ближней (1,67 и 2,32 мкм) и средней (7,2...8,3 мкм) инфракрасной (ИК) областях спектра. Для условий Арктики приборы, работающие по отражённой радиации Солнца в ближней ИК-области спектра, неэффективны. В докладе проанализированы измерения метана с помощью спектрометров среднего ИК-диапазона в Арктике и определены условия, для которых такие измерения возможны. Обсуждаются перспективы таких измерений в целях мониторинга метана в районах российской Арктики.