

Исследование динамики атмосферного пограничного слоя над заприпайной полыньей моря Лаптевых по данным WRF-моделирования

И. А. Репина, А. А. Аниферов

*Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН
Москва, 119017, Россия
E-mail: repina@ifaran.ru*

С помощью мезомасштабной модели WRF Polar исследовались атмосферные процессы над полыньей моря Лаптевых. В работе рассмотрен случай образования полыньи в море Лаптевых в период апрель – май 2008 г. Было выполнено сравнение модельных экспериментов с разными данными концентрации льда: для одного и того же времени было выполнено моделирование динамики атмосферного пограничного слоя при сплочённости льда, равной 100 %, и реальной сплочённости льда, взятой из спутниковых данных. Для анализа рассматривались как холодные, так и тёплые периоды, когда разница температур открытой воды и воздуха была незначительной. Модельные эксперименты проводились на сетке 10; 5 и 3 км, что позволило рассмотреть влияние горизонтального разрешения на точность эксперимента. Установлено влияние полыньи на поля температуры, скорости ветра и на процессы образования облачности над полыньей. Степень влияния зависит от синоптической ситуации в районе и уменьшается с усилением циклонической активности.

Ключевые слова: климат Арктики, полыньи и разводья, дистанционное зондирование, атмосферный пограничный слой, мезомасштабное моделирование

Одобрена к печати: 31.12.2017
DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-282-295

Введение

Климатические изменения, происходящие в настоящее время в Арктике, являются самыми драматическими на планете (Иванов и др., 2013). Но при этом Северный Ледовитый океан наиболее уязвим с точки зрения задач климатического моделирования. Многие процессы, которые влияют на глобальный климат региона, оказываются вне разрешения моделей. Особенно это касается динамики полыней и разводий (Hibler, Bryan, 1987; Morales Maqueda et al., 2004).

Полярной зимой холодная атмосфера и относительно тёплый океан разделены мощным слоем льда, что препятствует их взаимодействию. Но при образовании разрывов льда из-за большой разницы температур воды и окружающего воздуха возникают мощные конвективные потоки. Разница температур океана и воздуха в этих местах достигает 20–40 °С, и это позволяет большому количеству скрытого и явного тепла поступать из океана в атмосферу. Возможны два типа таких разрывов: полыньи — большие участки открытой воды размером от нескольких сотен метров до сотен километров, которые образуются зимой и, как правило, в одних и тех же местах, и разводья (каналы и трещины) — линейные подвижки льда, приводящие к разрывам шириной от 1 м до 1 км и длиной 1–100 км. Тепловые потоки над полыньями на один-два порядка больше, чем над паковым льдом (Maykut, 1978). Зимой и ранней весной из-за большой разницы температуры могут возникать потоки тепла величиной до 500–1000 Вт/м² (Репина и др., 2011; Andreas, Cash, 1999).

Неотъемлемой особенностью арктических морей являются так называемые заприпайные полыньи (Tamura, Ohshima, 2011). Они систематически образуются в зимний период между неподвижным припаем и сплочёнными дрейфующими льдами и представляют собой значительные пространства чистой воды и молодых льдов толщиной до 30 см. Механизмы образования заприпайных полыней могут быть связаны как с устойчивыми береговыми ветрами (Piase, 1987; Winsor, Björk, 2000), так и с внутренними океаническими процессами (Morales

Maqueda et al., 2004; Schneider, Budeus, 1995). В результате отдачи тепла в атмосферу в полыньях происходит интенсивное ледообразование, которое, в свою очередь, приводит к формированию уплотнённой воды, влияющей на гидрологические процессы на шельфе (Dmitrenko et al., 2004; Ivanov, Golovin, 2007; Markus et al., 1998). Несмотря на то что исследованию заприпайных полыней посвящено достаточное количество работ (см., например (Дмитренко и др., 2001; Карелин, 1981; Aagaard et al., 1981; Barber, Massom, 2007; Dethleff et al., 1998; Fiedler et al., 2010; Martin, Cavalieri, 1989; Morales Maqueda et al., 2004)), их роль в формировании климата Арктики до сих пор не определена. С этой целью проводятся как модельные (Danielson et al., 2006; Ernsdorf et al., 2011; Goosse, Fichefet, 2001; Winsor, Björk, 2000), так и спутниковые исследования (Adams et al., 2011; Cavalieri, Martin, 1994; Markus, Burns, 1995).

Крупномасштабный мониторинг арктического ледяного покрова невозможен без использования спутниковых данных. Это единственный способ получить представление о глобальной и региональной изменчивости состояния ледового покрова. Но возможности спутникового мониторинга ограничены радиометрическими свойствами датчиков и их пространственным разрешением (Willmes et al., 2010). Традиционно для исследования полыней по пространственным и временным характеристикам наиболее приемлемыми считаются данные пассивного микроволнового зондирования (радиометры SSM/I (Special Sensor Microwave Imager), SSMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer), AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer), AMSR-2) (Тихонов и др., 2016; Cavalieri, Martin, 1985, 1994; Kern et al., 2007; Markus, Burns, 1995; Nihashi et al., 2009; Zwally et al., 1985). Но полыни (и тем более разводья) часто оказываются вне зоны разрешения традиционных алгоритмов определения площади ледового покрова (Репина, Иванов, 2012; Тихонов и др., 2015), т.е. в подпиксельной области пассивного микроволнового зондирования. Для решения этой проблемы был разработан специальный алгоритм PSSM (Polynya SSM/I Signature Model) с разрешением 6,25 км для определения динамики площади заприпайных полыней по данным микроволнового зондирования (Markus, Burns, 1995). Лучше картографировать полыни позволяет более высокое пространственное разрешение AMSR-E, но участки открытой воды меньше 6 км шириной всё равно оказываются за пределами обзора спутника (Kern et al., 2007; Martin et al., 2005; Spreen et al., 2008). Изображения в видимой и инфракрасной областях, получаемые со спутниковых приборов MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), дают более высокое разрешение, но получение информации о поверхности в этом случае возможно только в безоблачных условиях, что в Арктике бывает редко. Тем не менее алгоритмы определения толщины и концентрации льда по видимым и инфракрасным изображениям широко применяются для определения площади полыней и особенно идентификации зон формирования молодого льда (Riggs et al., 2015; Wang et al., 2010). Однако их применение возможно только в синтезе с микроволновыми данными и с применением атмосферных моделей и различных статистических методов восстановления лакун на изображениях (Adams et al., 2011). Радары синтезированной апертуры (РСА) представляют изображения высокого разрешения (25 м) вне зависимости от времени суток и наличия облачного покрова. Для определения динамики полыней и разводий с помощью РСА разработан достаточно надёжный алгоритм (Dokken et al., 2002). Но существенным недостатком является низкое временное разрешение получаемых изображений при значительной временной изменчивости процессов в Арктике.

Спутниковый мониторинг динамики полыней крайне затруднён и по той причине, что при оценке площади полыней не учитываются участки, покрытые молодым льдом (Cavalieri, 1995; Kwok et al., 2007; Winsor, Björk, 2000). Исключение из площади полыни участков новообразованного тонкого льда приводит к существенной недооценке поступления тепла из океана в атмосферу в течение полярной зимы (Репина, Смирнов, 2000; Репина, Чечин, 2012).

Динамика границ полыни, а также потоки тепла и импульса на поверхности полыни определяются в большой мере приповерхностной скоростью ветра. Несмотря на свою важность, вопрос изменчивости скорости ветра над полынями остаётся малоизученным (Chechin et al., 2013). Результаты предыдущих исследований указывают как на возможное усиление скорости ветра над полыней (Репина, Чечин, 2012; Dare, Atkinson, 2000; Savijärvi,

2011), так и на её уменьшение (Fiedler et al., 2010) по сравнению с вышележащими слоями атмосферы и натекающим потоком. В некоторых работах (Dare, Atkinson, 2000; Savijärvi, 2011) указывается, что существенную роль в изменчивости скорости ветра, возможно, играют мезомасштабные градиенты давления, связанные с прогревом воздуха над полярной льдой. Кроме того, говорится о возможной роли полярной льды в формировании мезомасштабных циркуляций (Ebner et al., 2011; Hebbinghaus et al., 2007).

Поэтому для задач интерпретации спутниковых изображений крайне важным является проведение экспериментальных и модельных исследований атмосферных процессов над полярными льдами и разработка соответствующих параметризаций.

В данной работе с помощью мезомасштабного моделирования исследуется динамика и структура атмосферного пограничного слоя в районе заполярной льды. С целью оценки влияния полярной льды на региональный климат модельные эксперименты рассматривают как наличие реальной полярной льды, так и её отсутствие при аналогичной синоптической ситуации.

Методы исследования

В качестве объекта исследований выбрана заполярная льды моря Лаптевых. Этот район традиционно рассматривается как ключевой для мониторинга климатических изменений в морях Арктического шельфа (Arctic Climate..., 2004). В море Лаптевых в весенний период из-за сильных юго-восточных ветров образуются две полярные льды: Лено-Анабарская и Западная Новосибирская. Рассматриваемая нами Западная Новосибирская полярная льды может достигать больших размеров — несколько десятков километров в ширину и сотни километров в длину. Для моделирования был выбран период конец апреля — начало мая 2008 г. На *рис. 1* (см. с. 285) показана динамика полярной льды по снимкам РСА в рассматриваемый временной диапазон. Полярная льды устойчиво существовала с 8 апреля по 5 мая 2008 г., незначительно меняя площадь. В это время в районе Западной Новосибирской полярной льды работала российско-немецкая экспедиция Трансрифт (Ebner et al., 2011), что дало возможность провести валидацию результатов моделирования на реальных метеорологических данных. Получено, что в целом модель хорошо воспроизводит метеорологическую ситуацию в регионе.

Эксперименты проводились с помощью полярной версии мезомасштабной негидростатической модели WRF (Weather Research and Forecasting), содержащей следующий набор параметризаций физических процессов на подстилающей поверхности и в атмосфере (Bromwich et al., 2009):

1. Для описания планетарного пограничного слоя использован метод параметризации Меллора-Ямады-Янича (Janjic, 2002). Этот метод параметризации турбулентности в пограничном слое и свободной атмосфере представляет собой вариант замыкания турбулентности уровня 2,5 Меллора и Ямады.
2. Для описания тепловых процессов в снежно-ледяном покрове использованы однослойная модель снежного покрова, воспроизводящая снегонакопление, таяние снега и сублимацию водяного пара, и четырёхслойная модель морского льда для описания обмена теплом и влагой на границах «снег — атмосфера» и «снег — морской лёд» (Bromwich et al., 2009).
3. Для описания облачности использовался метод параметризации микрофизических процессов Моррисона, описывающий шесть типов гидрометеоров: водяной пар; водяные капли в облаках; ледяные кристаллы в облаках; дождь; снег; град (Morrison et al., 2008).
4. Для параметризации процессов переноса длинноволновой радиации использована модель, разработанная в Лаборатории геофизической гидродинамики (GFDL) (Schwarzkopf, Fels, 1991). Расчёт проводился в четырнадцати спектральных полосах поглощения двуокиси углерода, водяного пара и озона с учётом облачности. В модели используются коэффициенты пропускания для двуокиси углерода и континуума водяного пара. Для учёта поглощения длинноволнового излучения озоном использован метод Роджерса.

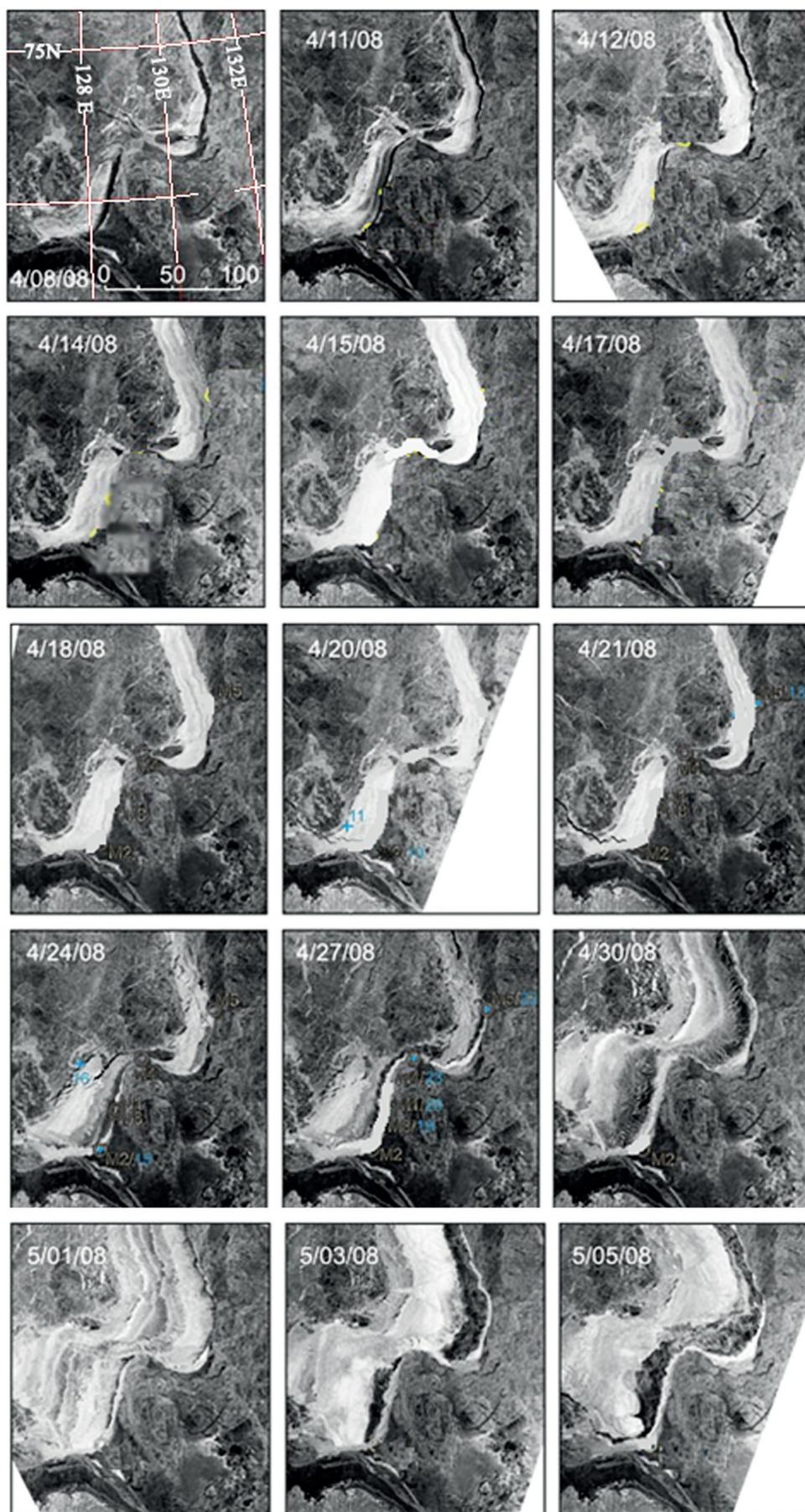


Рис. 1. ENVISAT ASAR (PCA) изображения полыни моря Лаптевых с 8 апреля по 5 мая 2008 г.

Полярная версия модели WRF отличается от стандартной заданием процессов на подстилающей поверхности. Если поверхность в значительной степени заснежена (более 97%), используется значение теплопроводности для снега, а не для почвы. Для заснеженных регионов используется теплота сублимации, для бесснежных — теплота парообразования. Кроме того, изменён ряд теплофизических характеристик подстилающей поверхности: альбедо, излучательная способность, теплопроводность.

Было выполнено шесть экспериментов: в трёх использовались карты сплочённости льда, восстановленные из спутниковых данных AMSR-E; в трёх других концентрация льда приравнивалась к 100%, что позволило оценить вклад полыньи в региональные атмосферные процессы — развитие приземного слоя, облакообразование, изменение силы и направления приземного ветра. Также были выполнены тестовые эксперименты при общей сплочённости льда 80% и покрытии полыньи льдом сплочённостью 85%. Использовались расчётные области с разрешением 10 км (WRF-10), 5 км (WRF-5) и 3 км (WRF-3). Домен WRF-10 охватывает район 740×610 км, в который попадает Лено-Анабарская (П2) и Новосибирская (П1) полыньи, дельта р. Лена и часть Новосибирских островов. Домен WRF-3 охватывает только Новосибирскую полынью, WRF-5 — обе полыньи. Расчёт проводился для временного интервала с 27 апреля по 3 мая 2008 г.

В качестве граничных и начальных данных использовались данные реанализа NCEP/FNL с пространственным разрешением 1° и временным разрешением 6 ч, а также данные по поверхностной температуре моря (RTG_SST) с разрешением 1/12° через каждые 24 ч. Для определения сплочённости льда использовались данные пассивного микроволнового зондирования радиометра AMSR-E с разрешением 6,25 км (алгоритм ARTIST (Arctic Radiation and Turbulence Interaction Study) (Spren et al., 2008)).

Результаты

Для сравнения во всех экспериментах с различным разрешением было выбрано несколько временных интервалов: в одних разница температуры воды и воздуха составляла –6...–7 °С, эти моменты времени были названы тёплыми (W); в других разница температур составляла –12...–14 °С, они были названы холодными (C). В экспериментах с разрешением 10 км количество точек по ширине полыньи П1 составляет около 5, но и в этом случае изменение температуры, влажности и полей ветра значительно. При сравнении с экспериментом без полыньи, когда концентрация льда в акватории моря Лаптевых приравнивалась к 100%, температура на уровне двух метров повышалась на несколько градусов в зависимости от погодных условий. На *рис. 2* (см. с. 287) представлена разница температуры на высоте 2,5 м в модельных экспериментах с полыньёй и без полыньи при разрешении в 10; 5 и 3 км в холодные моменты времени.

Видно, что полынья вносит существенные изменения в поле температуры, а средняя разность между экспериментами с полыньёй и без полыньи достигает 3,5 °С над П1 в WRF-10. При разрешении 5 км разница температуры «полынья — нет полыньи» составляет около 5 °С и возрастает неоднородность поля температуры, т. е. лучше видны мелкие структуры. Над полыньёй П2 разница температуры увеличивается до 2 °С. При разрешении 3 км явно виден контур поля температуры над П1 (П2 в этом эксперименте не захватывалась), а разность температуры составляет около 6 °С. В тёплые моменты времени эксперименты с разрешением 10 км плохо улавливают вклад полыньи в поле температуры.

Потоки тепла с поверхности, покрытой льдом, и с полыньи для разных временных интервалов также различны. Для тёплых погодных условий, когда температура натекающего на полынью потока воздуха составляет около –6...–7 °С, поток тепла с заснеженной поверхности льда несколько выше, а с поверхности полыньи ниже, чем при температуре –12...–14 °С. На *рис. 3* (см. с. 288) показан поток тепла для случаев W и C. Оценка величины потока явного тепла с использованием балк-формулы $H = \rho c_p C_H U_z (T_s - T_z)$ (здесь C_H — безразмерный

коэффициент обмена; c_p и ρ — теплоёмкость и плотность воздуха; H — турбулентный поток явного тепла; U_z , T_z — скорость ветра и температура на высоте z ; T_s — температура у подстилающей поверхности) даёт значение около 180 Вт/м^2 . Это близко к значению, получаемому в модельных экспериментах, — $160\text{--}170 \text{ Вт/м}^2$.

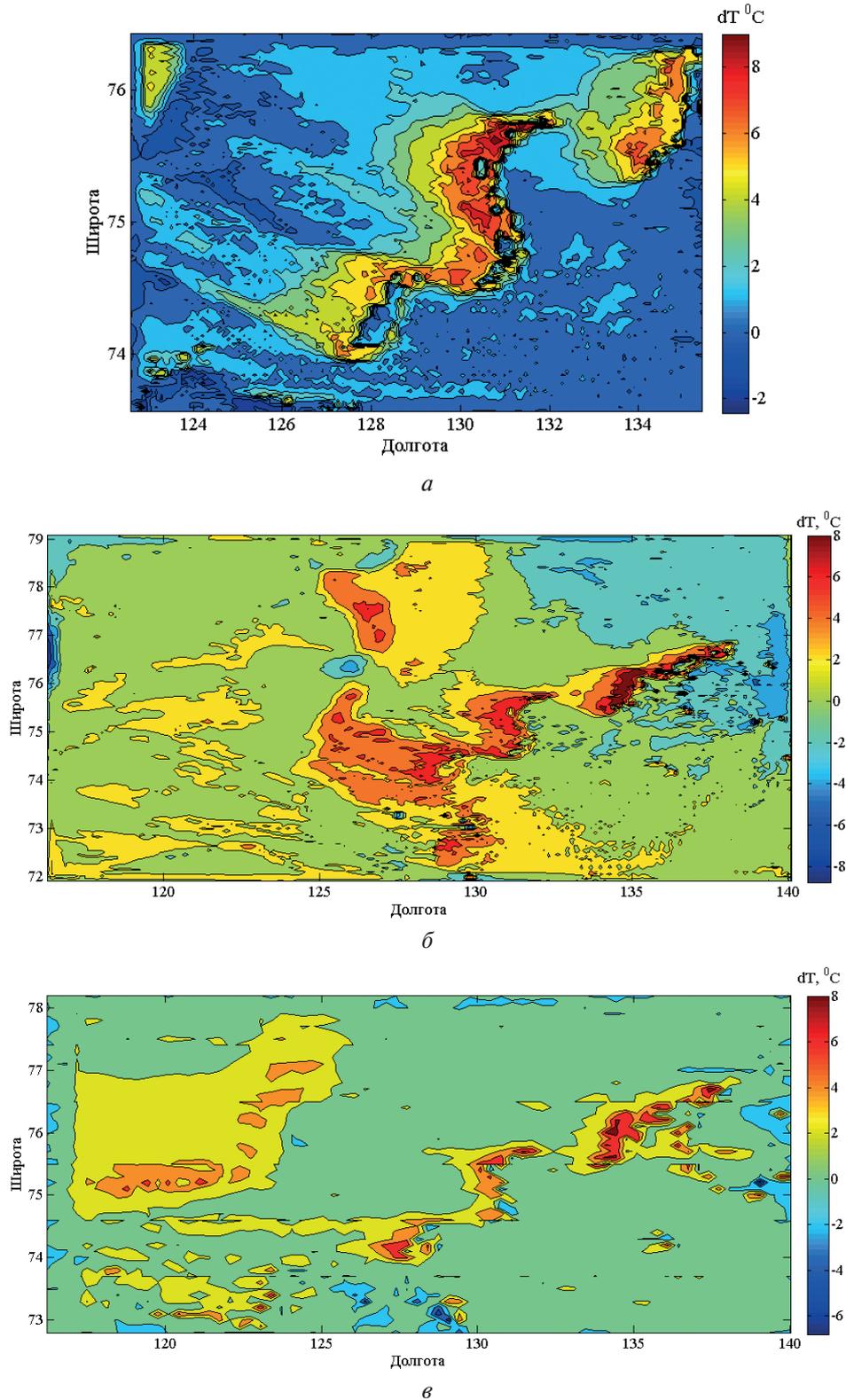


Рис. 2. Разница температуры в экспериментах с полярной пылью и без полярной пыли на уровне 2,5 м: а — WRF-3 (разрешение 3 км); б — WRF-5 (разрешение 5 км); в — WRF-10 (разрешение 10 км)

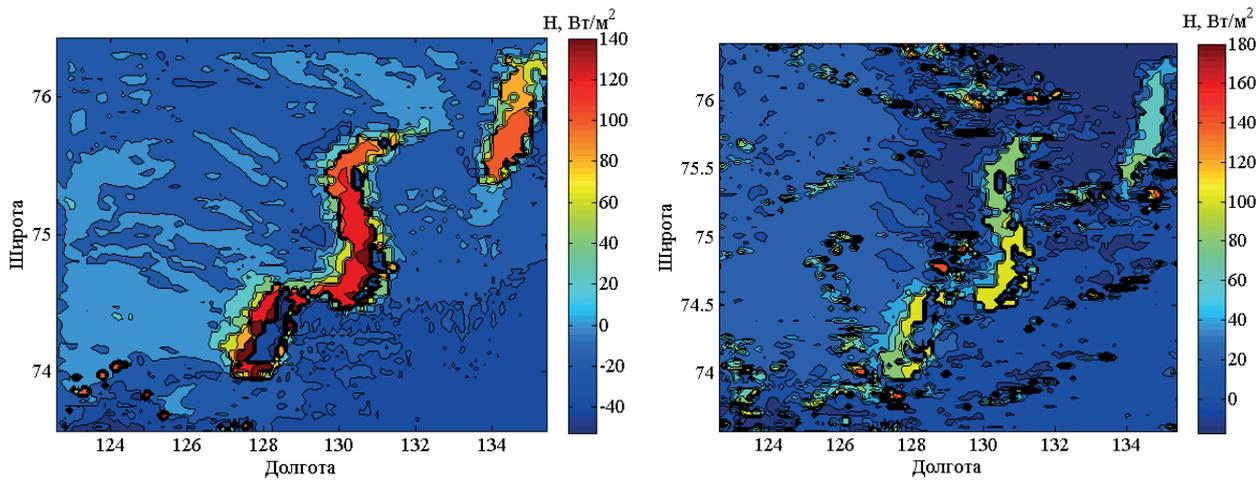


Рис. 3. Поток тепла для случаев С (слева) и W (справа). Разрешение 3 км

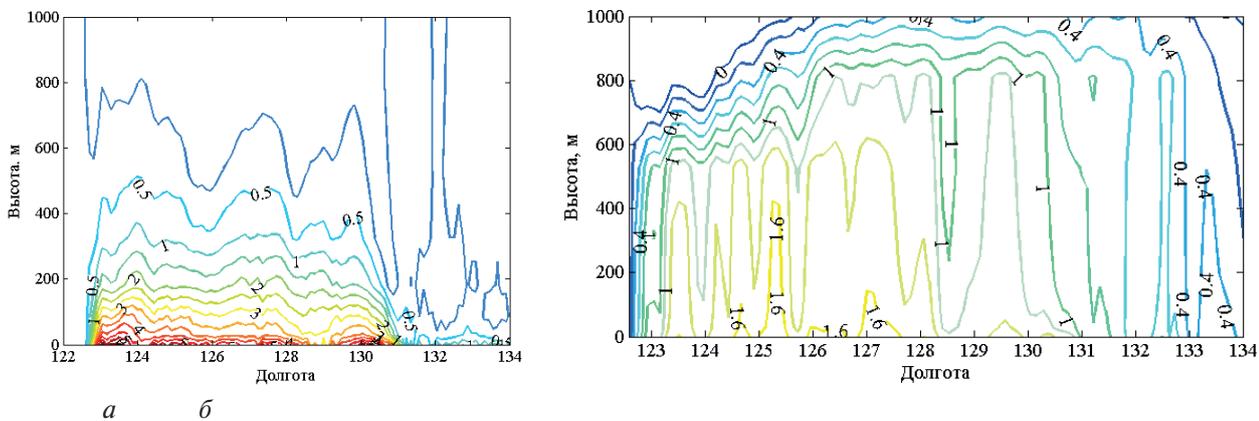


Рис. 4. Разница температур атмосферного пограничного слоя в случае с польнёй и без польни: а — случай С (холодный); б — случай W (тёплый)

Высота перемешанного слоя зависит от свойств натекающего на польню потока воздуха. Польня нагревает контактирующий с ней воздух, а гравитационные силы заставляют этот воздух перемешиваться с вышележащими слоями, увеличивая конвективные потоки тепла и влаги с поверхности. Турбулентные вихри, принесённые ветром, набирают силу над польнёй и захватывают в свой поток верхние слои воздуха. При большей разнице температуры воды и воздуха слой перемешанной атмосферы толще и её температура изменяется сильнее. Используя простую формулу, можно оценить высоту перемешанного слоя (Venkatram, 1977):

$$h = \frac{u_*}{u_m} \left[\frac{2(\theta_1 - \theta_2)}{\gamma(1 - 2F)} \right]^{1/2} \sim 400 \text{ м.}$$

Примерно такие же значения получаются в модели при сравнении экспериментов с польнёй и без польни. На рис. 4 представлена рассчитанная разница температур в атмосферном пограничном слое в случаях с польнёй и без неё вдоль разреза 74,7° с. ш.

Результаты расчётов также показывают влияние польни на скорость и направление ветра. Это хорошо видно из разности экспериментов с польнёй и без польни (рис. 5, см. с. 289). В верхней части области расчёта, около Таймырского п-ва, разность скорости ветра с польнёй и без польни отличается на 6 м/с. В случае, когда польня покрывается льдом, а во всей остальной области данные льда приравнивались к спутниковым значениям, получаются другие результаты.

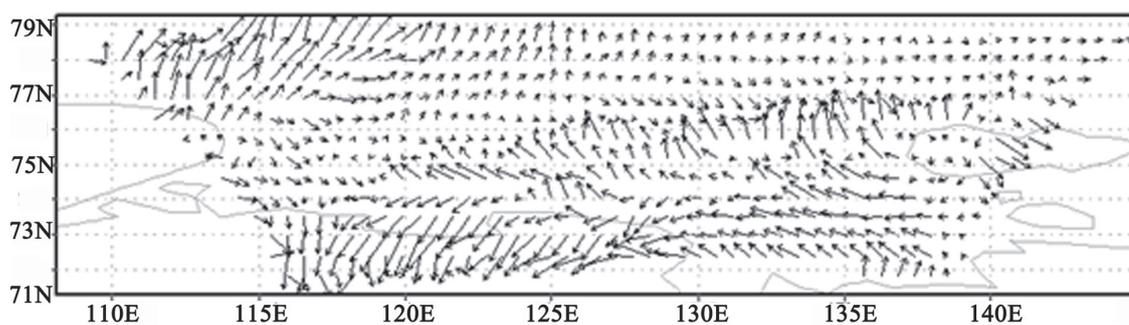


Рис. 5. Векторная разность полей ветра между экспериментами с польней и без польни. Случай С, WRF-5

Это означает, что модель чувствительна к концентрации льда, и её изменение на 20–30 % влияет на поле скорости ветра и его направление. Данный результат подтверждает ранее проведённые расчёты с использованием негидростатической модели, показавшие возникновение явления бриза (усиления ветра) при холодных вторжениях над открытой морской поверхностью (Репина, Чечин, 2012; Chechin et al., 2013).

Выводы

Исследование структуры атмосферного пограничного слоя над польнями даёт информацию как для математического моделирования, так и для разработки алгоритмов интерпретации спутниковых данных. Необходимо учитывать, что над участками открытой воды и тонкого молодого льда вклад турбулентного обмена в тепловой баланс превосходит радиационный: при отрицательных температурах воздуха поток тепла над польнями и разводьями положителен и может достигать нескольких сотен ватт на квадратный километр. Для описания динамики пограничного слоя атмосферы была использована полярная версия мезомасштабной модели WRF, верификация которой проводилась на данных российско-немецкого эксперимента Трансдрифт (апрель – май 2008 г.) в районе польни моря Лаптевых и спутниковых наблюдениях. Было выполнено сравнение экспериментов с разными данными концентрации льда: для одного и того же времени проводилось моделирование атмосферы при концентрации, равной 100 %, и реальной концентрации по спутниковым данным. Была посчитана разность для полей температуры, влажности и ветра над польней и сплошным льдом при различных погодных условиях. Всё это выполнялось при разном горизонтальном разрешении: 10; 5 и 3 км, что позволило рассмотреть влияние горизонтального разрешения на точность эксперимента. Установлено влияние польни на поля температуры, скорости ветра и на процессы образования облачности над польней. Степень влияния польни на динамику атмосферного пограничного слоя над ней и в окружающем регионе зависит от синоптической ситуации и уменьшается с усилением циклонической активности. Проведённые эксперименты показали, что возможна идентификация польней по изменению облачного, ветрового и температурного режима в районе их расположения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-05-01221).

Литература

1. *Дмитренко И. А., Кириллов С. А., Грибанов В. А., Кассенс Х.* Оценка ледопродуктивности стационарных польней на шельфе морей Карского и Лаптевых на основе многолетних гидрологических наблюдений // *Метеорология и гидрология*. 2001. № 12. С. 38–49.
2. *Иванов В. В., Алексеев В. А., Алексеева Т. А., Колдунов Н. В., Репина И. А., Смирнов А. В.* Арктический ледяной покров становится сезонным? // *Исследование Земли из космоса*. 2013. № 4. С. 50–65.

3. Карелин И. Д. Исследования стационарных полыней по данным наблюдений со спутников // Труды ААНИИ. 1981. Т. 388. С. 104–109.
4. Репина И. А., Смирнов А. С. Обмен теплом и импульсом между атмосферой и льдом по данным наблюдений в районе Земли Франца-Иосифа // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 5. С. 672–680.
5. Репина И. А., Иванов В. В. Применение методов дистанционного зондирования в исследовании динамики ледового покрова и современной климатической изменчивости Арктики // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 89–103.
6. Репина И. А., Чечин Д. Г. Влияние полыней и разводий в Арктике на структуру атмосферного пограничного слоя и региональный климат // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. № 4. С. 162–172.
7. Репина И. А., Артамонов А. Ю., Смирнов А. С., Чечин Д. Г. Исследование взаимодействия океана и атмосферы в полярных районах в рамках международного полярного года // Метеорологические и геофизические исследования / под ред. Г. В. Алексеева. М.-СПб., 2011. С. 236–250.
8. Тихонов В. В., Раев М. Д., Шарков Е. А., Боярский Д. А., Репина И. А., Комарова Н. Ю. Мониторинг морского льда полярных регионов с использованием спутниковой микроволновой радиометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 150–169.
9. Тихонов В. В., Раев М. Д., Шарков Е. А., Боярский Д. А., Репина И. А., Комарова Н. Ю. Спутниковая микроволновая радиометрия морского льда полярных регионов. Обзор // Исследование Земли из космоса. 2016. № 4. С. 65–84.
10. Aagaard K., Coachman L. K., Carmack E. On the halocline of Arctic Ocean // Deep-Sea Research. 1981. V. 28A. No. 6. P. 529–545.
11. Adams S., Willmes S., Heinemann G., Rozman P., Timmermann R., Schröder D. Evaluation of simulated sea-ice concentrations from sea-ice/ocean models using satellite data and polynya classification methods // Polar Research. 2011. V. 30. No. 7124. P. 17. DOI:10.3402/polar.v30i0.7124.
12. Andreas E. L., Cash B. A. Convective heat transfer over wintertime leads and polynyas // J. Geophysical Research. 1999. V. 104. No. C11. P. 25 721–25 734.
13. Arctic Climate Assessment (ACIA). Impacts of a warming arctic: Scientific Report. N. Y.: Cambridge Univ. Press, 2004. 139 p.
14. Barber D. G., Massom R. A. The role of sea ice in Arctic and Antarctic polynyas // Elsevier Oceanography Series. Polynyas: Windows to the World / eds. W. O. Smith, D. G. Barber. Amsterdam, 2007. P. 1–54.
15. Bromwich D. H., Hines K. M., Bai L. S. Developments and testing of Polar Weather Research and Forecasting model: 2. Arctic Ocean // J. Geophysical Research. 2009. V. 114. Iss. D8. CiteID D08122. DOI:10.1029/2008JD010300.
16. Cavalieri D. J. A Microwave Technique for Mapping Thin Sea Ice // J. Geophysical Research. 1995. V. 99. Iss. C6. P. 12 561–12 572.
17. Cavalieri D. J., Martin S. A passive-microwave study of polynyas along the Antarctic Wilkes Land coast // Oceanology of the Antarctic Continental Shelf. Antarctic Res. Ser. / ed. S. S. Jacobs. Washington: AGU, 1985. V. 43. P. 227–252.
18. Cavalieri D. J., Martin S. The contribution of Alaskan, Siberian, and Canadian coastal polynyas to the cold halocline layer of the Arctic Ocean // J. Geophysical Research. 1994. V. 99. Iss. C9. P. 18 343–18 362.
19. Chechin D. G., Lüpkes C., Repina I. A., Gryanik V. M. Idealized dry quasi 2-D mesoscale simulations of cold-air outbreaks over the marginal sea ice zone with fine and coarse resolution // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2013. V. 118. P. 8787–8813. DOI:10.1002/jgrd.50679.
20. Danielson S., Aagaard K., Weingartner T., Martin S., Winsor P., Gawarkiewicz G., Quadfasel D. The St. Lawrence polynya and the Bering shelf circulation: New observations and a model comparison // J. Geophysical Research. 2006. V. 111. Iss. C9. CiteID C09023. DOI:10.1029/2005JC003268.
21. Dare R. A., Atkinson B. W. Atmospheric response to spatial variations in concentration and size of polynyas in the Southern ocean sea-ice zone // Boundary-Layer Meteorology. 2000. V. 94. No. 1. P. 65–88.
22. Dethleff D., Loewe P., Kleine E. The Laptev Sea flaw lead — detailed investigation on ice formation and export during 1991/1992 winter season // Cold regions science and technology. 1998. V. 27. Iss. 3. P. 225–243.
23. Dmitrenko I., Tyshko K., Kirillov S., Eicken H., Hölemann J., Kassens H. Impact of flaw polynyas on the hydrography of the Laptev Sea // Global Planet Change. 2004. V. 48. No. 1–3. P. 9–27. DOI:10.1016/j.gloplacha.2004.12.016.
24. Dokken S. T., Winsor P., Markus T., Askne J., Björk G. ERS SAR characterization of coastal polynyas in the Arctic and comparison with SSM/I and numerical model investigations // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 80. Iss. 2. P. 321–335.

25. *Ebner L., Schroder D., Heinemann G.* Impact of Laptev Sea flaw polynyas on the atmospheric boundary layer and ice production using idealized mesoscale simulations // *Polar Research*. 2011. V. 30. P. 7210. DOI:10.3402/polar.v30i0.7210.
26. *Ernsdorf T., Schröder D., Adams S., Heinemann G., Timmermann R., Danilov S.* Impact of atmospheric forcing data on simulations of the Laptev Sea polynya dynamics using the sea-ice ocean model FESOM // *J. Geophysical Research*. 2011. V. 116. Iss. C12. CiteID C12038. P. 18. DOI:10.1029/2010JC006725.
27. *Fiedler E. K., Lachlan-Cope T. A., Renfrew I. A., King J. C.* Convective heat transfer over thin ice covered coastal polynyas // *J. Geophysical Research*. 2010. V. 115. Iss. C10. CiteID C10051.
28. *Goosse H., Fichefet T.* Open-ocean convection and polynya formation in a large-scale ice–ocean model // *Tellus*. 2001. V. 53A. P. 94–111.
29. *Hebbinghaus H., Schlunzen H., Dierrer S.* Sensitivity studies on vortex development over a polynya // *Theoretical and Applied Climatology*. 2007. V. 88. No. 1. P. 1–16.
30. *Hibler W. D., Bryan K.* A diagnostic ice–ocean model // *J. Physical Oceanography*. 1987. V. 17. No. 7. P. 987–1015.
31. *Janjic Z. I.* Nonsingular implementation of the Mellor–Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso Model // *NCEP Office Note*. 2002. No. 437. 61 p.
32. *Ivanov V. V., Golovin P. N.* Observations and modelling of dense water cascading from the Laptev Sea shelf // *J. Geophysical Research*. 2007. V. 112. Iss. C9. CiteID. P. 1–15. DOI:10.1029/2006JC003882.
33. *Kern S., Spreen G., Kaleschke L., De la Rosa S., Heygster G.* Polynya Signature Simulation Method polynya area in comparison to AMSR-E 89 GHz sea-ice concentrations in the Ross Sea and off the Adélie Coast, Antarctica, for 2002–05: first results // *Annals of Glaciology*. 2007. V. 46. No. 1. P. 409–418. DOI:10.3189/172756407782871585.
34. *Kwok R., Comiso J., Martin S., Drucker R.* Ross Sea polynyas: Response of ice concentration retrievals to large areas of thin ice // *J. Geophysical Research*. 2007. V. 112. Iss. 12. CiteID C12012. P. 13. DOI:10.1029/2006JC003967.
35. *Markus T., Burns B. A.* A method to estimate sub–pixel scale coastal polynyas with satellite passive microwave data // *J. Geophysical Research*. 1995. V. 100. Iss. C3. P. 4473–4487.
36. *Markus T., Kottmeier C., Fahrbach E.* Ice formation in coastal polynyas in the Weddell Sea and their impact on oceanic salinity // *Antarctic Sea Ice: Physical Processes, Interactions and Variability*. Antarctic Research Series / ed. M. O. Jeffries. Washington: AGU, 1998. V. 74. P. 273–292.
37. *Martin S., Cavalieri D. J.* Contributions of the Siberian shelf polynyas to the Arctic Ocean intermediate and deep water // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1989. V. 94. Iss. C9. P. 12725–12738.
38. *Martin S., Drucker R., Kwok R., Holt B.* Improvements in the estimates of ice thickness and production in the Chukchi Sea polynyas derived from AMSR-E // *Geophysical Research Letters*. 2005. V. 32. Iss. 5. P. L05505. DOI:10.1029/2004GL022013.
39. *Maykut C. A.* Energy exchange over young sea ice in the central Arctic // *J. Geophysical Research*. 1978. V. 83. Iss. C7. P. 3646–3658.
40. *Morales Maqueda M. A., Willmott A. J., Biggs N. R. T.* Polynya dynamics: A review of observations and modeling // *Reviews Geophysics*. 2004. V. 42. Iss. 1. P. RG1004. DOI:10.1029/2002RG000116.
41. *Morrison H., Thompson G., Tatarskii V.* Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes // *Monthly Weather Review*. 2008. V. 137. Iss. 3. P. 991–1007.
42. *Nihashi S., Ohshima K. I., Tamura T., Fukamachi Y., Saitoh S.* Thickness and production of sea ice in the Okhotsk Sea coastal polynyas from AMSR-E // *J. Geophysical Research*. 2009. V. 114. Iss. C10. CiteID C10025. DOI:10.1029/2008JC005222.
43. *Piase C. H.* The size of wind-driven polynyas // *J. Geophysical Research*. 1987. V. 92. P. 7049–7059.
44. *Riggs G. A., Hall D. K., Salomonson V. V.* MODIS Sea Ice Products: User Guide to Collection 6. 2015. URL: <https://nsidc.org/sites/nsidc.org/files/files/modis-sea-ice-user-guide-C6%5B1%5D.pdf>.
45. *Savijärvi H.* Antarctic local wind dynamics and polynya effects on the Adélie Land coast // *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.* 2011. V. 137. No. 660. P. 1804–1811.
46. *Schneider W., Budeus G.* On the generation of the Northeast water polynya // *J. Geophysical Research*. 1995. V. 100. Iss. C3. P. 4269–4286.
47. *Schwarzkopf M. D., Fels S. B.* The simplified exchange method revisite — an accurate, rapid method for computation of infrared cooling rates and fluxes // *J. Geophysical Research*. 1991. V. 96. Iss. D5. P. 9075–9096.
48. *Spreen G., Kaleschke L., Heygster G.* Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels // *J. Geophysical Research*. 2008. V. 113. Iss. C2. CiteID C02S03. DOI:10.1029/2005JC003384.
49. *Tamura T., Ohshima K. I.* Mapping of sea ice production in the Arctic coastal polynyas // *J. Geophysical Research*. 2011. V. 116. Iss. C7. CiteID C07030. DOI:10.1029/2010JC006586.

50. Venkatram A. A model of internal boundary-layer development // *Boundary-Layer Meteorology*. 1977. V. 11. Iss. 4. P. 419–437.
51. Wang X., Key J. R., Liu Y. A thermodynamic model for estimating sea and lake ice thickness with optical satellite data // *J. Geophysical Research*. 2010. V. 115. Iss. C12. CiteID C12035. P. 14. DOI:10.1029/2009JC005857.
52. Willmes S., Krumpen T., Adams S., Rabenstein L., Haas C., Hölemann J., Hendricks S., Heinemann G. Cross-validation of polynya monitoring methods from multisensor satellite and airborne data: a case study for the Laptev Sea // *Canadian J. Remote Sensing*. 2010. V. 36. P. 196–210. DOI:10.5589/m10-012.
53. Winsor P., Björk G. Polynya activity in the Arctic Ocean from 1958 to 1997 // *J. Geophysical Research*. 2000. V. 105. Iss. C4. P. 8789–8803.
54. Zwally H. J., Comiso J. C., Gordon A. L. Antarctic offshore leads and polynyas and oceanographic effects *Oceanology of the Antarctic Continental Shelf* // *Antarctic Research Series* / ed. S. S. Jacobs. Washington: AGU, 1985. V. 43. P. 203–226.

Investigation of the atmospheric boundary layer dynamics over the Laptev Sea coastal polynya using WRF modelling

I. A. Repina, A. A. Aniferov

A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia
E-mail: repina@ifaran.ru

Using the mesoscale model WRF Polar, atmospheric processes were studied over the polynyas of the Laptev Sea. In the paper the case of polynyas formation in April – May 2008 in the Laptev Sea was considered. Comparison of model experiments with different ice concentration data was performed: in one case the dynamics of the atmospheric boundary layer was simulated at 100% ice concentration, in the other case real ice concentration was taken from satellite data. Cold and warm periods, when the temperature contrast between the water and the air was small, were considered. Model experiments were conducted on a grid of 10; 5 and 3 km, which allowed us to consider the effect of horizontal resolution on the accuracy of the experiment. The influence of polynya on the temperature, wind speed and cloud formation over the polynya was established. The degree of influence depends on the synoptic conditions in the region and decreases with the increase in cyclonic activity.

Keywords: Arctic climate, polynyas and leads, remote sensing, atmospheric boundary layer, mesoscale modelling

Accepted: 31.12.2017

DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-282-295

References

1. Dmitrenko I. A., Kirillov S. A., Griбанov V. A., Kassens H., Otsenka ledoproduktivnosti stacionarnykh polynei na shel'fe morei Karskogo i Laptevykh na osnove mnogoletnikh gidrologicheskikh nablyudenii (Sea-ice production over the Laptev Sea and Kara sea shelf polynya inferred from historical summer-to-winter hydrographic observations), *Meteorology i Hydrologia*, 2001, No. 12, pp. 38–49.
2. Ivanov V. V., Alexeev V. A., Alexeeva T. A., Koldunov N. V., Repina I. A., Smirnov A. V., Arkticheskie ledyanoi pokrov stanovitsya sezonnym? (Does Arctic Ocean Ice Cover Become Seasonal?), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 4, pp. 50–65.
3. Karelin I. D., Issledovaniya stacionarnykh polynei po dannym nablyudenii so sputnikov (Coastal polynya investigations with satellite data), *Trudy AANII*, 1981, Vol. 388, pp. 104–109.
4. Repina I. A., Smirnov A. S., Heat and momentum exchange between the atmosphere and ice from the observational data obtained in the region of Franz Josef land, *Izvestia RAN, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2000, Vol. 36, No. 5, pp. 618–626.

5. Repina I. A., Ivanov V. V., *Primenenie metodov distantsionnogo zondirovaniya v issledovanii dinamiki ledovogo pokrova i sovremennoi klimaticheskoi izmenchivosti Arktiki (Remote sensing in ice sea dynamic and modern Arctic climate investigation)*, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 89–103.
6. Repina I. A., Chechin D. G., *Vliyaniye polynei i razvodii v Arktike na strukturu atmosfernogo pogranichnogo sloya i regional'nyi klimat (Effect of the Arctic polynyas and leads on the atmospheric boundary layer structure and the regional climate)*, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 4, pp. 162–172.
7. Repina I. A., Artamonov A. Yu., Smirnov A. S., Chechin D. G., *Issledovanie vzaimodeistviya okeana i atmosfery v polyarnykh raionakh v ramkakh mezhdunarodnogo polyarnogo goda (The investigation of the air-sea interaction in the Polar regions in IPY framework)*, *Meteorologicheskie i geofizicheskie issledovania*, G. V. Alekseev (ed.), Moscow – St. Petersburg, 2011, pp. 236–250.
8. Tikhonov V. V., Raev M. D., Sharkov E. A., Boyarskii D. A., Repina I. A., Komarova N. Yu., *Monitoring morskogo l'da polyarnykh regionov s ispol'zovaniem sputnikovoi mikrovolnovoi radiometrii (Sea ice of polar regions monitoring with satellite microwave radiometry)*, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 150–169.
9. Tikhonov V. V., Raev M. D., Sharkov E. A., Boyarskii D. A., Repina I. A., Komarova N. Yu., *Sputnikovaya mikrovolnovaya radiometriya morskogo l'da polyarnykh regionov. Obzor (Satellite microwave radiometry of sea ice of polar regions. Review)*, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 4, pp. 65–84.
10. Aagaard K., Coachman L. K., Carmack E., *On the halocline of Arctic Ocean*, *Deep-Sea Research*, 1981, Vol. 28A, No. 6, pp. 529–545.
11. Adams S., Willmes S., Heinemann G., Rozman P., Timmermann R., Schröder D., *Evaluation of simulated sea-ice concentrations from sea-ice/ocean models using satellite data and polynya classification methods*, *Polar Res.*, 2011, Vol. 30, No. 7124, p. 17, DOI:10.3402/polar.v30i0.7124.
12. Andreas E. L., Cash B. A., *Convective heat transfer over wintertime leads and polynyas*, *J. Geophys. Res.*, 1999, Vol. 104, Issue C11, pp. 25721–25734.
13. *Arctic Climate Assessment (ACIA). Impacts of a Warming Arctic, Scientific Report*, New York: Cambridge Univ. Press, 2004, 139 p.
14. Barber D. G., Massom R. A., *The role of sea ice in Arctic and Antarctic polynyas*, *Elsevier Oceanography Series. Polynyas: Windows to the World*, W. O. Smith, D. G. Barber (eds.), Amsterdam, 2007, pp. 1–54.
15. Bromwich D. H., Hines K. M., Bai L. S., *Developments and testing of Polar Weather Research and Forecasting model: 2. Arctic Ocean*, *J. Geophys. Res.*, 2009, Vol. 114, Issue D8, CiteID D08122, DOI:10.1029/2008JD010300.
16. Cavalieri D. J., *A Microwave Technique for Mapping Thin Sea Ice*, *J. Geophys. Res.*, 1995, Vol. 99, Issue C6, pp. 12561–12572.
17. Cavalieri D. J., Martin S., *A passive-microwave study of polynyas along the Antarctic Wilkes Land coast*, *Oceanology of the Antarctic Continental Shelf. Antarctic Research Series*, S. S. Jacobs (ed.), Washington: AGU, 1985, Vol. 43, pp. 227–252.
18. Cavalieri D. J., Martin S., *The contribution of Alaskan, Siberian, and Canadian coastal polynyas to the cold halocline layer of the Arctic Ocean*, *J. Geophys. Res.*, 1994, Vol. 99, Issue C9, pp. 18343–18362.
19. Chechin D. G., Lüpke C., Repina I. A., Gryanik V. M., *Idealized dry quasi 2-D mesoscale simulations of cold-air outbreaks over the marginal sea ice zone with fine and coarse resolution*, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2013, Vol. 118, pp. 8787–8813, DOI:10.1002/jgrd.50679.
20. Danielson S., Aagaard K., Weingartner T., Martin S., Winsor P., Gawarkiewicz G., Quadfasel D., *The St. Lawrence polynya and the Bering shelf circulation: New observations and a model comparison*, *J. Geophys. Res.*, 2006, Vol. 111, Issue C9, CiteID C09023, DOI:10.1029/2005JC003268.
21. Dare R. A., Atkinson B. W., *Atmospheric response to spatial variations in concentration and size of polynyas in the Southern ocean sea-ice zone*, *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, Vol. 94, No. 1, pp. 65–88.
22. Dethleff D., Loewe P., Kleine E., *The Laptev Sea flaw lead — detailed investigation on ice formation and export during 1991/1992 winter season*, *Cold regions science and technology*, 1998, Vol. 27, Issue 3, pp. 225–243.
23. Dmitrenko I., Tyshko K., Kirillov S., Eicken H., Hölemann J., Kassens H., *Impact of flaw polynyas on the hydrography of the Laptev Sea*, *Global Planet Change*, 2004, Vol. 48, No. 1–3, pp. 9–27, DOI:10.1016/j.gloplacha.2004.12.016.
24. Dokken S. T., Winsor P., Markus T., Askne J., Björk G., *ERS SAR characterization of coastal polynyas in the Arctic and comparison with SSM/I and numerical model investigations*, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 80, Issue 2, pp. 321–335.

25. Ebner L., Schroder D., Heinemann G., Impact of Laptev Sea flaw polynyas on the atmospheric boundary layer and ice production using idealized mesoscale simulations, *Polar Research*, 2011, Vol. 30, p. 7210, DOI:10.3402/polar.v30i0.7210.
26. Ernsdorf T., Schröder D., Adams S., Heinemann G., Timmermann R., Danilov S., Impact of atmospheric forcing data on simulations of the Laptev Sea polynya dynamics using the sea-ice ocean model FESOM, *J. Geophys. Res.*, 2011, Vol. 116, Issue C12, CiteID C12038, p. 18, DOI:10.1029/2010JC006725.
27. Fiedler E. K., Lachlan-Cope T. A., Renfrew I. A., King J. C., Convective heat transfer over thin ice covered coastal polynyas, *J. Geophys. Res.*, 2010, Vol. 115, Issue C10, CiteID C10051.
28. Goosse H., Fichefet T., Open-ocean convection and polynya formation in a large-scale ice–ocean model, *Tellus*, 2001, Vol. 53A, pp. 94–111.
29. Hebbinghaus H., Schlunzen H., Dierrer S., Sensitivity studies on vortex development over a polynya, *Theoretical and Applied Climatology*, 2007, Vol. 88, No. 1, pp. 1–16.
30. Hibler W. D., Bryan K., A diagnostic ice–ocean model, *J. Phys. Oceanogr.*, 1987, Vol. 17, No. 7, pp. 987–1015.
31. Janjic Z. I., Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso Model, *NCEP Office Note*, 2002, No. 437, 61 p.
32. Ivanov V. V., Golovin P. N., Observations and modelling of dense water cascading from the Laptev Sea shelf, *J. Geophys. Res.*, 2007, Vol. 112, Issue C9, CiteID C09003, pp. 1–15, DOI:10.1029/2006JC003882.
33. Kern S., Spreen G., Kaleschke L., De la Rosa S., Heygster G., Polynya Signature Simulation Method polynya area in comparison to AMSR-E 89 GHz sea-ice concentrations in the Ross Sea and off the Adélie Coast, Antarctica, for 2002–05: first results, *Ann. Glaciol.*, 2007, Vol. 46, No. 1, pp. 409–418, DOI:10.3189/172756407782871585.
34. Kwok R., Comiso J., Martin S., Drucker R., Ross Sea polynyas: Response of ice concentration retrievals to large areas of thin ice, *J. Geophys. Res.*, 2007, Vol. 112, Issue C12, CiteID C12012, pp. 13, DOI: 10.1029/2006JC003967.
35. Markus T., Burns B. A., A method to estimate sub–pixel scale coastal polynyas with satellite passive microwave data, *J. Geophys. Res.*, 1995, Vol. 100, Issue C3, pp. 4473–4487.
36. Markus T., Kottmeier C., Fahrbach E., Ice formation in coastal polynyas in the Weddell Sea and their impact on oceanic salinity, *Antarctic Sea Ice: Physical Processes, Interactions and Variability. Antarctic Research Series*, M. O. Jeffries (ed.), Washington: AGU, 1998, Vol. 74, pp. 273–292.
37. Martin S., Cavalieri D. J., Contributions of the Siberian shelf polynyas to the Arctic Ocean intermediate and deep water, *J. Geophys. Res.: Oceans*, 1989, Vol. 94, Issue C9, pp. 12725–12738.
38. Martin S., Drucker R., Kwok R., Holt B., Improvements in the estimates of ice thickness and production in the Chukchi Sea polynyas derived from AMSR-E, *Geophys. Res. Lett.*, 2005, Vol. 32, Issue 5, p. L05505, DOI:10.1029/2004GL022013.
39. Maykut C. A., Energy exchange over young sea ice in the central Arctic, *J. Geophys. Res.*, 1978, Vol. 83, Issue C7, pp. 3646–3658.
40. Morales Maqueda M. A., Willmott A. J., Biggs N. R. T., Polynya dynamics: A review of observations and modeling, *Rev. Geophys.*, 2004, Vol. 42, Issue 1, p. RG1004, DOI:10.1029/2002RG000116.
41. Morrison H., Thompson G., Tatarskii V., Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes, *Monthly Weather Review*, 2008, Vol. 137, Issue 3, pp. 991–1007.
42. Nihashi S., Ohshima K. I., Tamura T., Fukamachi Y., Saitoh S., Thickness and production of sea ice in the Okhotsk Sea coastal polynyas from AMSR-E, *J. Geophys. Res.*, 2009, Vol. 114, Issue C10, CiteID C10025, DOI:10.1029/2008JC005222.
43. Piase C. H., The size of wind-driven polynyas, *J. Geophys. Res.*, 1987, Vol. 92, pp. 7049–7059.
44. Riggs G. A., Hall D. K., Salomonson V. V., *MODIS Sea Ice Products: User Guide to Collection 6*, 2012, <https://nsidc.org/sites/nsidc.org/files/files/modis-sea-ice-user-guide-C6%5B1%5D.pdf>.
45. Savijärvi H., Antarctic local wind dynamics and polynya effects on the Adélie Land coast, *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.*, 2011, Vol. 137, No. 660, pp. 1804–1811.
46. Schneider W., Budeus G., On the generation of the Northeast water polynya, *J. Geophys. Res.*, 1995, Vol. 100, Issue C3, pp. 4269–4286.
47. Schwarzkopf M. D., Fels S. B., The simplified exchange method revisited — an accurate, rapid method for computation of infrared cooling rates and fluxes, *J. Geophys. Res.*, 1991, Vol. 96, Issue D5, pp. 9075–9096.
48. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G., Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels, *J. Geophys. Res.*, 2008, Vol. 113, Issue C2, CiteID C02S03, DOI:10.1029/2005JC003384.
49. Tamura T., Ohshima K. I., Mapping of sea ice production in the Arctic coastal polynyas, *J. Geophys. Res.*, 2011, Vol. 116, Issue C7, CiteID C07030, DOI:10.1029/2010JC006586.

50. Venkatram A., A model of internal boundary-layer development, *Boundary-Layer Meteorology*, 1977, Vol. 11, Issue 4, pp. 419–437.
51. Wang X., Key J.R., Liu Y., A thermodynamic model for estimating sea and lake ice thickness with optical satellite data, *J. Geophys. Res.*, 2010, Vol. 115, Issue C12, CiteID C12035, p. 14, DOI:10.1029/2009JC005857.
52. Willmes S., Krumpfen T., Adams S., Rabenstein L., Haas C., Hölemann J., Hendricks S., Heinemann G., Cross-validation of polynya monitoring methods from multisensor satellite and airborne data: a case study for the Laptev Sea, *Can. J. Remote Sens.*, 2010, Vol. 36, pp. 196–210, DOI:10.5589/m10-012.
53. Winsor P., Björk G., Polynya activity in the Arctic Ocean from 1958 to 1997, *J. Geophys. Res.*, 2000, Vol. 105, Issue C4, pp. 8789–8803.
54. Zwally H.J., Comiso J.C., Gordon A.L., Antarctic offshore leads and polynyas and oceanographic effects Oceanology of the Antarctic Continental Shelf, *Antarctic Research Series*, S.S. Jacobs (ed.), Washington: AGU, 1985, Vol. 43, pp. 203–226.