

Изучение атмосферной конвекции над арктической полярной пустыней с применением суперкомпьютерных вычислений и спутниковых данных высокого разрешения

В.М. Степаненко¹, А.В. Дебольский², М.И. Варенцов³,
Д.Е. Кузнецов⁴, М.И. Зимин⁵

Ключевые слова: полярная пустыня, атмосферная конвекция, термики, вихререзающая модель, спутниковые снимки, суперкомпьютер

Key words: polynya, atmospheric convection, thermals, large eddy simulation model, satellite images, supercomputer

С 26 января по 6 февраля 2011 г. научное студенческое общество (НСО) кафедры метеорологии и климатологии географического факультета МГУ провело экспедицию на Белом море (руководитель экспедиции — П.И. Константинов). Экспедиция базировалась на Беломорской биологической станции (ББС) МГУ, находящейся на п-ове Киндо (северо-западное побережье моря). Одной из основных задач экспедиции ста-

ла оценка влияния полярной пустыни в проливе Великая Салма на режим основных метеорологических величин в приземном (приводном) слое воздуха. В частности, необходимо было рассчитать количество тепла, выделяемое участком открытой воды в атмосферу. Интерес к такой задаче вызван тем, что полярные пустыни обуславливают положительную обратную связь с потеплением климата тропосферы в высоких широтах. При потеплении климата площадь льдов Арктики сокращается, пло-

¹Ст. н. с., к. ф. -м.н., Научно-исследовательский вычислительный центр, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, тел.: +7(495)939-23-53, e-mail: vstepanenkomeister@gmail.com

²Студент, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, тел.: +7(495)939-29-42, e-mail: and.debol@gmail.com

³Студент, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, тел.: +7(495)939-29-42, e-mail: mvar91@gmail.com

⁴Научный сотрудник, НИЛ геоэкологии Севера, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, тел.: +7(495)939-25-26, e-mail: dkzn.at@gmail.com

⁵К. г. н., руководитель отдела геодезии и картографии ИТЦ «СКАНЭКС», 119021, г. Москва, ул. Россолимо, д. 5/22, стр. 1, www.scanex.ru, e-mail: zimmin@scanex.ru

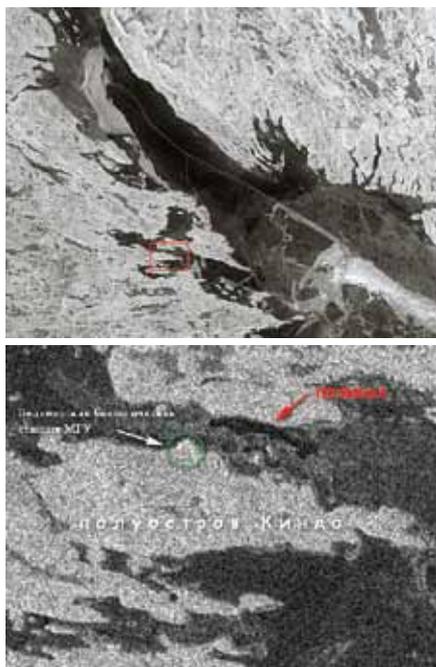


Рис. 1. Кандалакшский зал. Район экспедиции научного студенческого общества на радарном снимке разрешения 25 м. Снимок RADARSAT-1, дата съемки 7 февраля 2011 г. (© MDA, ИТЦ «СКАНЭКС»)

щадь полыней увеличивается, а последние являются значительным источником тепла для атмосферы (их температура на 10–20°C выше температуры окружающего льда), способствуя дальнейшему потеплению климата. Недостаточное развитие параметризаций турбулентного обмена между поверхностью океана, покрытой очень неоднородным и прерывистым ледовым покровом, и вышележащей атмосферой, по-видимому, является одной из причин значительных межмодельных различий результатов расчетов современного и будущего климата Арктики глобальными климатическими моделями.

Из соображений техники безопасности экспериментальное исследование полыни в проливе Большая Салма in situ в условиях экспедиции было невозможно, включая измерение метеорологических величин контактными датчиками над полыней и в ее непосредственной близости на по-

верхности льда, а также достаточно точное определение границы полыни с помощью традиционно используемых для таких задач средств, например, GPS-навигации на местности. В связи с этим для воспроизведения динамики пограничного слоя атмосферы над полыней был выбран метод трехмерного численного гидродинамического моделирования, а для получения фактических данных о границе полыни использовались данные дистанционного зондирования. Благодаря ИТЦ «СКАНЭКС» была организована оперативная спутниковая съемка района исследований. Основной целью съемки стало обеспечение экспедиции актуальными космическими снимками на момент проведения полевых работ.

В качестве наиболее надежного источника получения оперативной информации выступают данные, получаемые с помощью радиолокаторов бокового обзора, что особенно актуально в условиях полярной ночи и облачных погодных условий. Кроме того, стоит отметить: основной целью использования материалов дистанционного зондирования являлось получение зеркала открытой водной поверхности, что надежно фиксируется радиолокаци-

онными снимками на фоне покрытых льдом акваторий и ландшафтов суши.

7 февраля 2011 г. было получено радиолокационное изображение со спутника RADARSAT-1. Съемка производилась в режиме Standard, луч S6, пространственное разрешение 25 м, размер кадра 100×100 км.

Радарный снимок в формате GeoTIFF (рис. 1) был загружен в геоинформационную систему ESRI ArcGIS и наложен на цифровую модель рельефа района экспедиции. Разрешающей способности полученного снимка оказалось вполне достаточно для отражения основных особенностей формы полыни пролива Великая Салма (ширина полыни — 200–300 м, длина — около 2 км, площадь — около 0.45 кв. км). В результате был получен файл формата ASCII-grid, содержащий одновременно высоты рельефа и геометрию полыни (рис. 2).

Затем этот файл использовался в вихреразрешающей модели Института вычислительной математики (ИВМ) РАН (Glazunov and Lykossov, 2003) для формирования пространственных распределений характеристик подстилающей поверхности — температуры поверхности и коэффи-

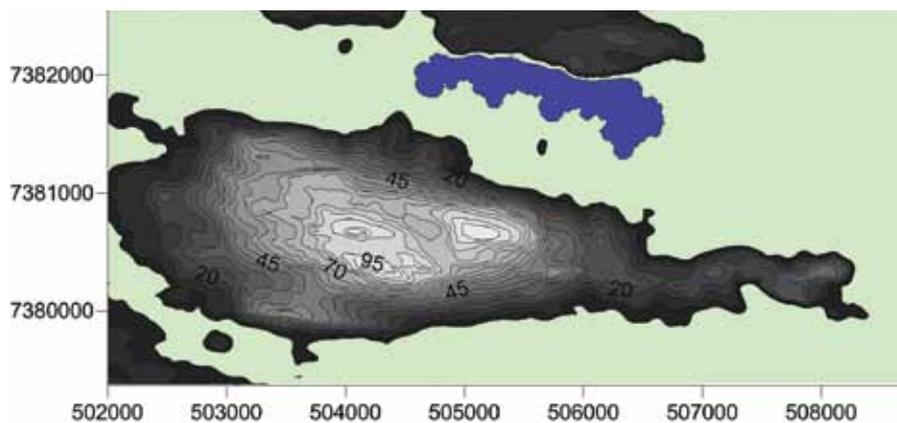


Рис. 2. Гипсометрическая карта-схема района экспедиции НСО. Синим ареалом отмечена полынья. По горизонтальной и вертикальной осям отложены условные декартовы координаты, м

циента шероховатости. Температура поверхности снега на льду принималась постоянной и равной -21.8°C (значение, близкое к тем, которые наблюдались на поверхности снега на ББС в течение экспедиции), а температура воды -1.8°C (температура замерзания при характерной солености Белого моря). Использование в качестве нижнего граничного условия постоянной температуры снега на льду оправдано тем, что численный эксперимент длился 45 минут модельного времени, и за это время температура реальной поверхности снега, как правило, существенно не меняется. Постановка граничных условий на боковой границе, на которой воздушный поток входит в расчетную область, является сложной задачей, поскольку этот поток на границе должен отвечать статистическим свойствам турбулентного потока, формирующегося над однородной поверхностью льда. Эта проблема была решена с привлечением алгоритма сопряжения двух численных экспериментов, предложенного и примененного в вихререшающей модели А.В. Глазуновым. На противоположной боковой границе нормальные к границе производные переменных модели полагались равными нулю. На другой паре боковых границ использовались периодические граничные условия. В качестве начальных условий для потенциальной температуры использовался кусочно-линейный профиль: в нижнем слое толщиной 50 м температура принималась равной -20.5°C , выше — увеличивалась линейно с градиентом $0.006^{\circ}\text{C}/\text{м}$. Форма этого профиля является типичной для нижней тропосферы Арктики, а градиент температуры был выбран равным среднему градиенту температуры в соответствующем слое по данным радиозондирования в г. Кандалякше. Широтная компонента скорости

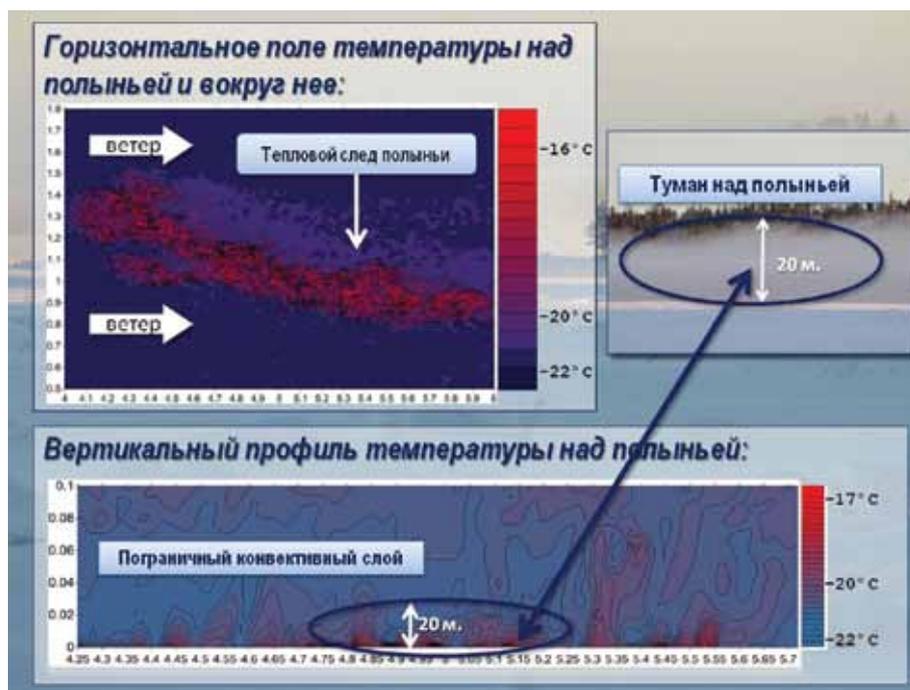


Рис. 3. Поле температуры воздуха в горизонтальной и вертикальной плоскости над полыньей по данным моделирования; фотография тумана над полыньей, сделанная с южного берега пролива Великая Салма в период экспедиции

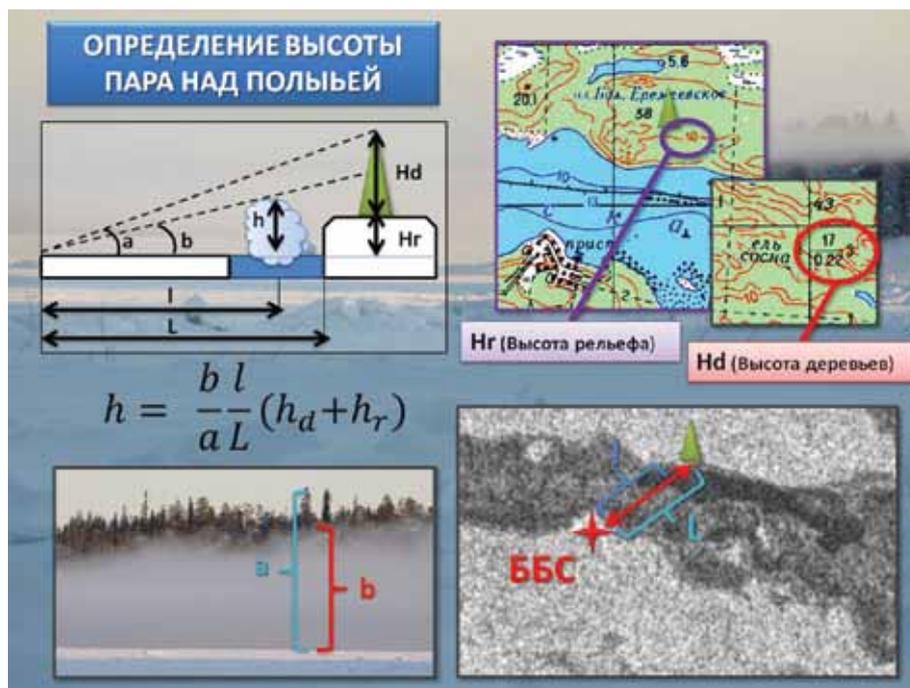


Рис. 4. Схема оценки высоты тумана над полыньей по данным фотографирования с южного берега пролива Великая Салма

ветра в начальный момент времени была принята равной 10 м/с во всей расчетной области, меридиональная и вертикальная скорости полагались равными нулю. Уравнение переноса для влажности воздуха в модели не решалось, поток скрытого тепла в приземном (приводном) слое не учитывался. В модели использовалось высокое пространственное разрешение — 3 м по вертикальной координате и 12.5 м по горизонтальным координатам — что привело к большому размеру конечно-разностной сетки и потребовало использования 310 вычислительных ядер суперкомпьютера МГУ «Ломоносов». Такое разрешение было выбрано в силу необходимости достаточного вертикального разрешения конвективного пограничного слоя над полярной льдом, высота которого составляет около 20 м (см. ниже).

В численном эксперименте явно воспроизводился конвективный пограничный слой над полярной льдом, вызванный мощным потоком явного тепла на поверхности полярной льдом (рис. 3). Средний по поверхности полярной льдом поток явного тепла оказался равным около 500 Вт/кв. м. Для оценки достоверности результатов моделирования использовались данные фотографирования тумана над полярной льдом с южного берега пролива, выполненного в период экспедиции (рис. 4). Как видно на рисунке, по фотографиям и топографическим картам была оценена высота верхней границы тумана. Если в ходе конвекции образуется туман, то его верхнюю границу можно считать оценкой границы конвективного пограничного слоя, поскольку конденсация водяного пара происходит в восходящих термических и прекращается, когда прекращается вертикальное движение воздуха. Оказалось, что характерные высоты, которых достигают отдельные термические в модели, находятся в интер-

вале 10–40 м (рис. 3), в то время как по данным наблюдений высота пара над полярной льдом составила около 20 м. Таким образом, можно предполагать, что модель реалистично воспроизвела высоту конвективного пограничного слоя над полярной льдом в проливе Большая Салма. Корректное сопоставление с натурными данными, однако, подразумевает расчет высоты пограничного слоя по профилю разрешаемых моделью явно турбулентных потоков, что планируется сделать на следующих этапах исследования.

Очевидно, что на поверхности полярной льдом велик поток скрытого тепла. Добавление водяного пара в воздух сообщает ему дополнительную плавучесть. Дополнительная плавучесть появляется у воздушной частицы также при конденсации водяного пара (т.е. в нашем случае — при образовании тумана внутри конвективного пограничного слоя). Возможным развитием настоящей работы может быть включение этих эффектов в вихререшающую модель.

Приведенные результаты демонстрируют, что совместное использование данных дистанционного зондирования высокого пространственного разрешения и высокопроизводительных вычислительных технологий, основанных на сложных моделях геофизической гидротермодинамики, позволяет получить ценную информацию о динамике атмосферного потока, которую невозможно получить по данным контактных наблюдений *in situ*. Опыт использования этих технологий в рамках студенческих экспедиций свидетельствует также о безусловной пользе их внедрения в образовательный процесс. Студенты получают в свое распоряжение инструмент, наглядно демонстрирующий физические процессы и механизмы, которые реализуются в атмосфере.

Авторы выражают персональную благодарность П.И. Константинову за организацию экспедиции на Беломорскую биологическую станцию, а также А.В. Глазунову за многочисленные консультации по постановке численных экспериментов с вихререшающей гидротермодинамической моделью.

Литература:

1. Glazunov A.V., Lykossov V.N. Large eddy simulation of interaction of ocean and atmospheric boundary layers. Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2003., Vol. 18, No. 4. PP. 279–295.

Study of Atmospheric Convection Over the Arctic Ice Opening Applying Supercomputer Computations and High Resolution Satellite Data. By V. Stepanenko, A. Debolsky, M. Varentsov, D. Kuznetsov, M. Zimin

According to the results of the expedition on the White Sea in winter 2011, an experimental study of the opening in the ice of the Bolshaya Salma Strait was carried out. A method of 3D numerical hydrodynamic modeling was applied to simulate the dynamics of the frontier atmospheric layer over the opening in the ice, whereas remote sensing data was used to get the actual data about the limits of the ice opening.