

*А.П. Максина, К.Г. Рубинштейн, В.И. Бьчкова,  
Р.Ю. Игнатов, С.В. Шуталин*

## **ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В АРКТИЧЕСКОМ РАЙОНЕ ПОЛЯРНОЙ ВЕРСИЕЙ МОДЕЛИ WRF**

### **Введение**

В последние десятилетия в Арктике произошли существенные изменения. Значительное увеличение частоты прохождения и интенсивности циклонов привело в итоге к повышению температуры воздуха. На фоне потепления чаще стала проявляться экстремальность погодных явлений: увеличиваются значения максимальных и минимальных температур, чаще наблюдаются штормовые ветры и резкие перепады температуры и давления воздуха, увеличивается количество разовых выпадений осадков и пр. Все это вызывает потребность в совершенствовании описания физических процессов в Арктическом регионе с целью улучшения методов и моделей прогноза погоды и климата.

Прежде всего это относится к описанию процессов в устойчиво-во-стратифицированном пограничном слое атмосферы. Сравнение результатов расчетов по наиболее совершенным термодинамическим моделям морского ледяного покрова с данными наблюдений в период российской-американской экспедиции «Уэдделл-1» показало, что ошибки в оценке температуры поверхности снежно-ледяного покрова могут достигать 10 °С, что существенно как при расчетах скорости нарастания льда, так и при разработке методов оценки его толщины по спутниковым данным. Некорректный упрощенный учет взаимодействия атмосферы и ледяного покрова при различной стратификации атмосферного пограничного слоя приводит к существенным ошибкам при моделировании дрейфа льда, особенно при интегрировании моделей на длительные сроки. Ярким примером некорректности описания состояния полярной атмосферы служат данные реанализа NCEP/NCAR, широко используемого в настоящее время при климатических

исследованиях. Как показано в [7], эти данные содержат значительные ошибки по температуре приледного слоя воздуха (до 8–10 °С) и существенно неадекватно описывают облачность.

Решение перечисленных выше проблем требует комплексного подхода, заключающегося в проведении скоординированных метеорологических, аэрологических, аэрологических и актинометрических наблюдений с использованием данных качественного синоптического анализа и результатов численного моделирования с помощью крупномасштабных и мезомасштабных моделей атмосферы.

В данной статье изложены предварительные результаты численных экспериментов, выполненных с помощью полярной версии мезомасштабной негидростатической метеорологической модели WRF (Weather Research and Forecasting Model), и их верификации на основе данных метеорологических и аэрологических наблюдений, полученных в ходе работ на дрейфующих станциях «Северный полюс-35» (СП-35) и «Северный полюс-36» (СП-36).

## 1. Описание версии модели WRF

Для проведения численных экспериментов была использована последняя версия модели WRF 3.1.1, опубликованная 31 июля 2009 года [3], содержащая следующий набор методов параметров и физический набор параметров на подстилающей поверхности и в атмосфере:

- Для описания планетарного пограничного слоя использован метод параметризации Меллора–Ямады [3–5]. Этот метод параметризации турбулентности в пограничном слое и свободной атмосфере представляет собой вариант замыкания турбулентности уровня 2,5 Меллора и Ямады [6].
- Для описания тепловых процессов в снежно-ледяном покрове использованы однослойная модель снежного покрова, воспроизводящая снегонакопление, таяние снега и сублимацию водяного пара, и четырехслойная модель морского льда для описания обмена теплом и влагой на границах снег–атмосфера и снег–морской лед. В этой модели, толщина слоя снега была принята равной 75 см. Температура нижней границы льда считалась постоянной (–2 °С).

- Для описания облачности использовался метод параметризации микрофизических процессов Моррисона [7, 8], описывающий шесть типов гидрометеоров: водяной пар, водяные капли в облаках, ледяные кристаллы в облаках, дождь, снег, град.

- Для параметризации процессов переноса длинноволновой радиации использована модель, разработанная в Лаборатории геофизической гидродинамики (GFDL), базирующаяся на работах Фелса и Шварцкофа [1, 12]. Расчет производился в четырнадцати спектральных полосах поглощения двуокиси углерода, водяного пара и озона с учетом облачности. В модели используются коэффициенты пропускания Шварцкофа и Фелса [12] для двуокиси углерода и коэффициенты пропускания Роберта и др. [10] для континуума водяного пара. Для учета поглощения длинноволнового поглощения озоном использован метод Роджерса [9].

Для верификации результатов моделирования с применением полярной версии модели WRF были использованы данные метеорологических и аэрологических наблюдений с дрейфующих станций СП-35 и СП-36, дрейф которых происходил в двух принципиально разных с точки зрения циркуляции атмосферы районах Арктики (рис. 1). Это позволило оценить качество прогностических расчетов как для района интенсивной циклонической деятельности в приатлантическом секторе Арктики (СП-35), так и преимущественно антициклонической циркуляции в районе круговорота Бофорта (СП-36).

Для численных экспериментов были выбраны две области расчета (рис. 2): первая область – район дрейфа СП-35 (вблизи Новой Земли, центр находится в точке с координатами 87° с.ш., 137° з.д.), в расчете использовано горизонтальное разрешение 2 км, проекция – полярная стереографическая; вторая область – район дрейфа СП-36 (вблизи Шпицбергена), использовано пространственное разрешение 7 км.

В качестве начальных и граничных условий использован анализ NCAR (Национальный центр атмосферных исследований), который имеет горизонтальное разрешение 1°, временное разрешение – 6 часов, вертикальное – 23 стандартные изобарические поверхности. Начальные и граничные условия получены интерполяцией на выбранную сетку расчетных областей. Граничные условия обновлялись каждые шесть часов. Модель интегрировалась на 36 часов.

Расчет велся на 42 сигма-поверхностях, значения которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Номера сигма-поверхностей и их значения в экспериментах с полярной версией модели WRF

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Значение	1,000	0,9995	0,998	0,995	0,990	0,985	0,980	0,975	0,965
№	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Значение	0,955	0,940	0,925	0,910	0,895	0,875	0,855	0,835	0,810
№	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Значение	0,785	0,755	0,725	0,695	0,660	0,625	0,590	0,540	0,485
№	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Значение	0,425	0,360	0,300	0,250	0,200	0,160	0,125	0,100	0,075
№	37	38	39	40	41	42			
Значение	0,050	0,035	0,025	0,015	0,010	0,000			

## 2. Анализ результатов численных экспериментов

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

На данном этапе экспериментов основной задачей являлось получение оценок прогноза основных метеорологических параметров для безоблачной и облачной атмосферы над дрейфующими станциями. Эти базовые оценки были необходимы для дальнейших работ по совершенствованию методов параметризации физических процессов на подстилающей поверхности. Кроме того, была сделана попытка выяснить, насколько полярная версия лучше описывает процессы в атмосфере Арктического бассейна, чем стандартная.

Еще одной, дополнительной, задачей экспериментов была оценка необходимого пространственного разрешения моделей в расчетах. С одной стороны, в зимних условиях подстилающая поверхность весьма

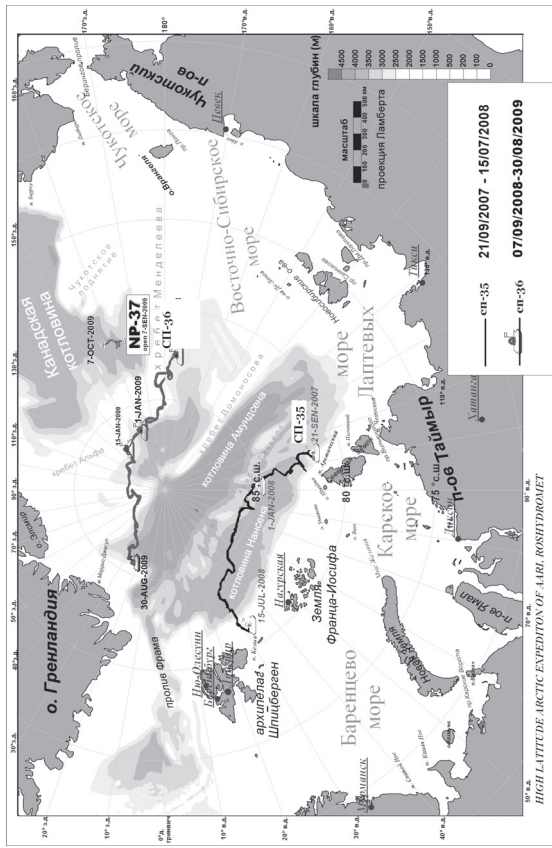


Рис. 1. Траектории дрейфа станций «Северный полюс-35» и «Северный полюс-36»

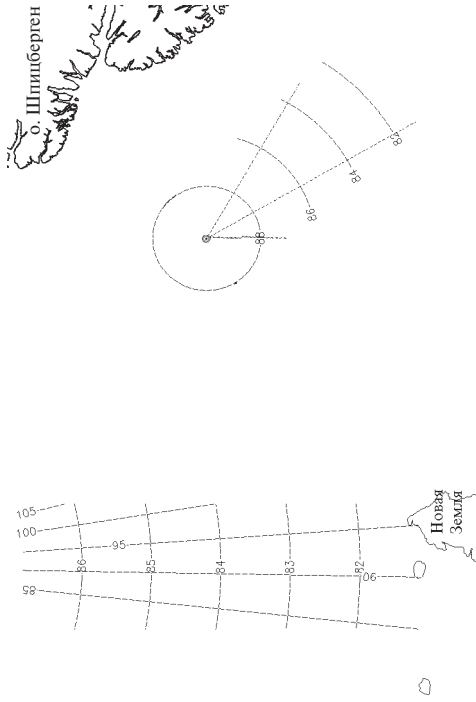


Рис. 2. Области расчета для сравнения с данными дрейфующих станций: слева – первая расчетная область для СП-35, справа – вторая расчетная область для СП-36

однородна и не требует высокого разрешения, с другой стороны, в переходные периоды, когда начинают появляться полянные или морские льды вместо воды, поверхность становится крайне неоднородной и требует детального описания. Именно поэтому расчеты были выполнены с разным пространственным разрешением для первой и второй областей.

Для оценок качества прогноза в атмосфере над дрейфующими станциями СП-35 и СП-36 использованы среденные по времени данные натурных измерений с десятисекундной дискретностью.

В анализе результатов выделены условия облачной и безоблачной атмосферы в соответствии с данными наблюдений:

— для первой области: облачные условия наблюдались с 19.01.2008 г. по 24.01.2008 г., безоблачные — с 11.12.2007 г. по 19.12.2007 г.;

— для второй области: облачный период — с 24.01.2009 г. по 30.01.2009 г., безоблачный — с 11.02.2009 г. по 19.02.2009 г.

Оценки рассчитаны для каждого из четырех периодов. Модель интегрировалась на 36 часов. Оценивались результаты экспериментов на 12, 18, 24, 30 и 36-й час прогноза.

На рис. 3 представлен вертикальный профиль относительной влажности воздуха, усредненной за 6 часов, в облачный и безоблачный периоды для станции СП-35. Разделение на облачную и безоблачную атмосферу по данным наблюдений соответствует результатам моделирования. Величины относительной влажности в нижних слоях атмосферы сильно отличаются. Относительная влажность около 100 % свидетельствует о наличии облачности. Для безоблачного случая эта величина не достигает 75 %.

На рис. 4 показан прогноз приземной температуры воздуха на уровне 2 м полярной и стандартной версий модели в сравнении с данными наблюдений в безоблачной атмосфере над СП-35. Полярная версия наблюдений в безоблачной атмосфере над СП-35. Полярная версия модели воспроизводит температуру с заметно меньшими ошибками. Средняя абсолютная ошибка приземной температуры в полярной версии составила 1,4 °С, а в стандартной версии — порядка 10 °С. В связи с этим дальнейшие результаты приведены только для полярной версии модели.

В табл. 2–5 представлены результаты численных прогнозов приземных метеорологических величин, рассчитанных для безоблачного и облачного периодов для станций СП-35 и СП-36.

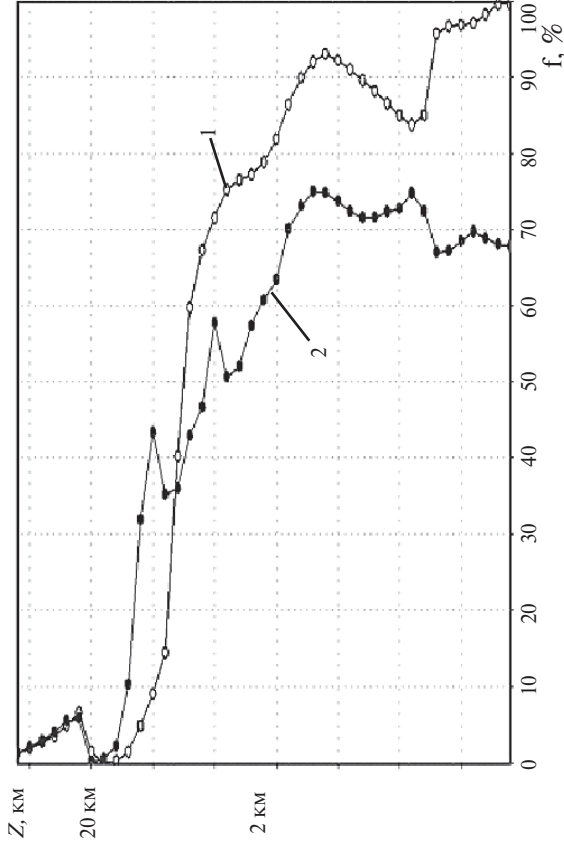


Рис. 3. Пример вертикального профиля относительной влажности (модель WRF) в случае облачной (1) и безоблачной погоды (2) по данным наблюдений

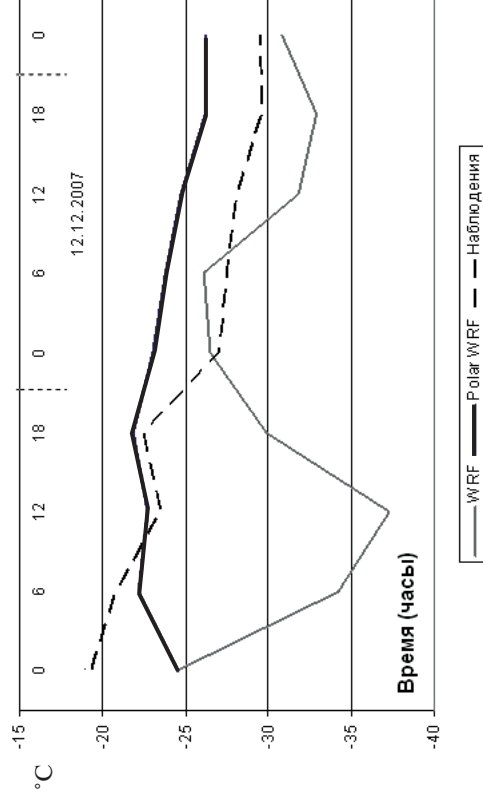


Рис. 4. Прогноз температуры на уровне 2 м полярной и стандартной версий модели WRF и данные наблюдений в безоблачной атмосфере над СП-35

Таблица 2  
Абсолютные ошибки численных прогнозов приземной температуры воздуха на уровне 2 м, град.

Абсолютная ошибка	Облачный период		Безоблачный период	
	СП-35	СП-36	СП-35	СП-36
минимальная	0,1	0,8	0,2	0,5
максимальная	3,9	9,3	3,9	8,0
средняя	2,7	2,8	1,1	3,2

Таблица 3  
Абсолютные ошибки численных прогнозов относительной влажности на уровне 2 м, %

Абсолютная ошибка	Облачный период		Безоблачный период	
	СП-35	СП-36	СП-35	СП-36
минимальная	0	-2	-1	0
максимальная	15	-25	7	-8
средняя	7	-8	3,7	4

Таблица 4  
Абсолютные ошибки численных прогнозов приземного атмосферного давления, гПа

Абсолютная ошибка	Облачный период		Безоблачный период	
	СП-35	СП-36	СП-35	СП-36
минимальная	0,2	0,3	0,8	0,1
максимальная	7	3,5	3,4	2,4
средняя	3,2	1,7	2,0	1,1

Таблица 5  
Абсолютные ошибки численных прогнозов модуля скорости ветра на уровне 10 м, м/с

Абсолютная ошибка	Облачный период		Безоблачный период	
	СП-35	СП-36	СП-35	СП-36
минимальная	0,2	0,1	0,2	0,0
максимальная	4,7	3,0	2,9	3,5
средняя	1,1	1,5	0,9	1,1

Средние ошибки приземной температуры, относительной влажности и давления над СП-35 меньше, чем над СП-36. Их абсолютные величины для безоблачной атмосферы вполне сравнимы с ошибками

в средних широтах [2]. В облачной атмосфере над СП-35 ошибки увеличились более чем в два раза. Над СП-36 увеличились максимальные ошибки.

Ошибки в прогнозе относительной влажности (табл. 3) над СП-35 несколько больше, чем ошибки над СП-36. При этом при переходе от безоблачного периода к облачному в обеих областях средние ошибки практически удвоились, а максимальные стали еще значительнее.

Абсолютные ошибки в прогнозе приземного атмосферного давления (табл. 4) в безоблачный период над областью СП-36 ниже, чем над областью СП-35. В облачной атмосфере для обеих областей ошибки практически удваиваются.

Ошибки прогноза скорости ветра для безоблачной атмосферы в области СП-35 несколько меньше, чем в области СП-36. В облачный период средние ошибки для обеих областей возросли, причем для СП-35 в меньшей степени, чем для СП-36.

Обобщая анализ качества воспроизведения приземных характеристик над полярными областями, можно констатировать, что основные характеристики атмосферы прогнозируются с точностью, сравнимой с точностью, характерной для средних широт [2]. Повышение пространственного разрешения (СП-35 по сравнению с СП-36) позволяет воспроизводить с несколько большей точностью приземную температуру, влажность и скорость ветра, в то же время приземное атмосферное давление воспроизводится с несколько большими ошибками. Возможно, для прогнозирования атмосферных процессов в полярных областях оптимальным будет пространственное разрешение, среднее между 2 и 7 км — порядка 5 км.

Кроме того, все параметры в обеих областях в облачные периоды воспроизводились значительно хуже, чем в безоблачные. Причиной этого могут быть как недостатки в воспроизведении облачности модели, так и проблемы, связанные с учетом облачности в радиационном алгоритме. Ответы на эти вопросы предстоит получить в дальнейшем.

Кроме приземных параметров атмосферы, проанализированы результаты прогноза вертикального распределения температуры, влажности и скорости ветра над СП-35.

В качестве примера на рис. 5–7 приведены графики суточного прогноза вертикальных профилей метеорологических элементов в

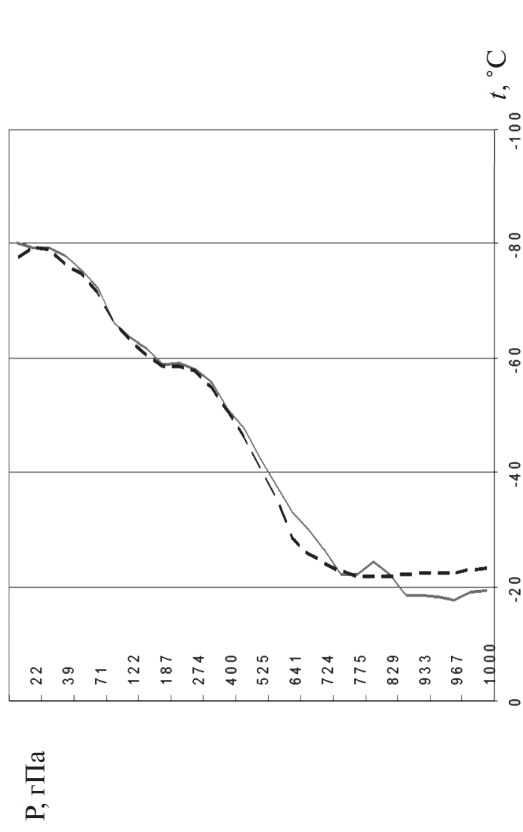


Рис. 5. Вертикальный профиль температуры воздуха: прогностической (пунктир) и измеренной (сплошная) 11.12.2007 г. для безоблачной атмосферы над СП-35

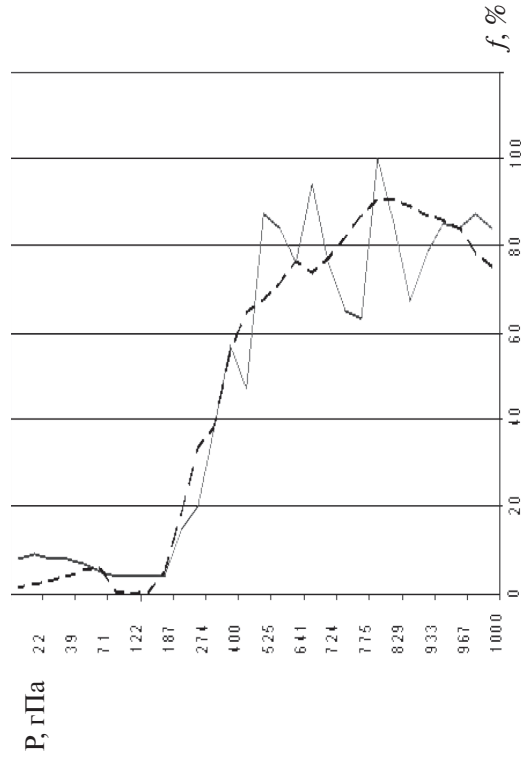


Рис. 6. Вертикальный профиль относительной влажности воздуха: прогностической (пунктирная линия) и измеренной (сплошная линия) 11.12.2007 года

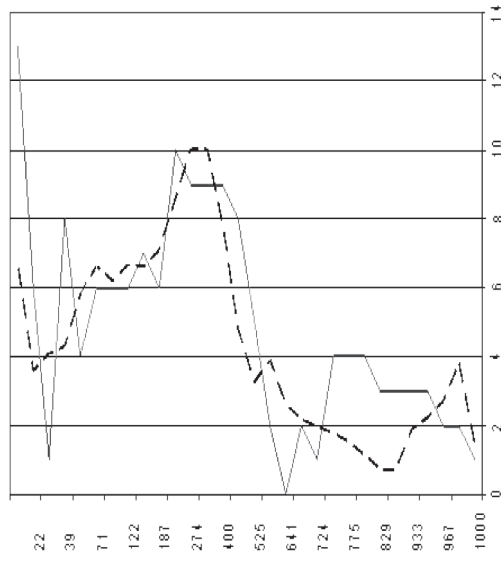


Рис. 7. Вертикальные профили скорости ветра: прогностической (пунктирная линия) и измеренной (сплошная линия) 11.12.2007 г.

сравнении с результатами радиозондирования для безоблачной атмосферы 11 декабря 2007 года над СП-35 в 23.30 в точке с координатами 83,15° с.ш., 97,11° в.д.

На рис. 5 приведены вертикальные профили температуры воздуха, полученные в суточном прогнозе на этот срок. Можно видеть, что выше 400 гПа значения прогностической температуры практически полностью совпадают с измерениями. В пограничном слое прогностическая температура оказывается ниже наблюдавшейся. При этом прогностическая кривая более сглажена, чем измеренная. Максимальная абсолютная ошибка температуры составляет 4,8°С на высоте 960 гПа.

На рис. 6 приведены вертикальные профили относительной влажности воздуха. Видно, что в прогнозе описана общая тенденция распределения относительной влажности с высотой, но не воспроизводятся детально ее изменения. Максимальная ошибка в 21 % находится на высоте в 890 гПа. Несмотря на то, что рассматриваемый случай относится к безоблачной атмосфере, возможно, что в действительности были незначительные облачные скопления (на это

указывает 100 % влажность в нескольких тонких слоях), которые модель не воспроизвела.

На рис. 7 приведено вертикальное распределение скорости ветра в суточном прогнозе и по данным радиозонда. В прогнозе выше 400 гПа ошибки значительно уменьшаются.

С целью обобщения результатов рассчитаны средние разности модельных и измеренных величин и среднее квадратическое отклонение (СКО). Для расчета отклонения для каждого из временных периодов — облачного и безоблачного — использованы данные четырех запусков радиозондов, на основе которых и проводилось сравнение. Результаты представлены в табл. 6.

*Таблица 6*  
**Осредненные разности между рассчитанными и измеренными вертикальными профилями температуры, относительной влажности и скорости ветра для СП-35**

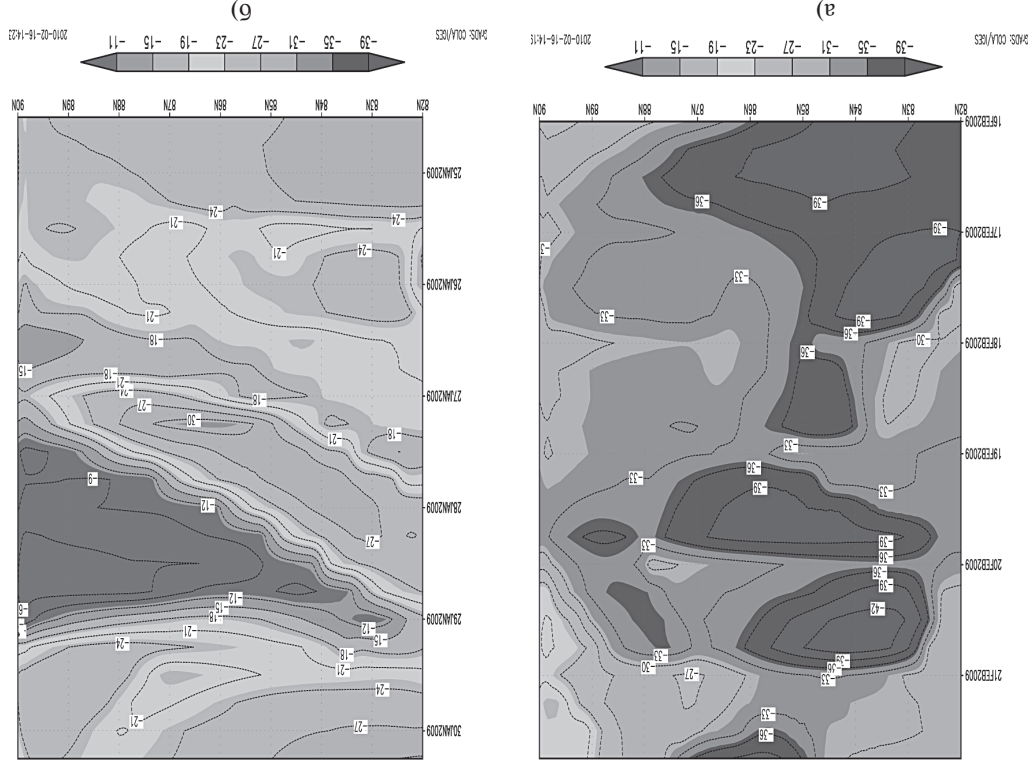
	Облачный период		Безоблачный период	
	Средняя разность	СКО	Средняя разность	СКО
Температура, °С	1,9	1,6	2,1	1,7
Относительная влажность, %	10,9	11,3	8,5	7,3
Модуль скорости ветра, м/с	1,7	1,4	1,8	1,3

Заметной зависимости в средних разностях температуры и скорости ветра от облачности не наблюдается. Средняя разность относительной влажности увеличивается при переходе к облачной атмосфере: возрастает как сама разность, так и ее СКО.

В заключение на рис. 8 приведены две диаграммы Ховмеллера для безоблачной и облачной атмосферы над СП-36. Эти диаграммы демонстрируют изменчивость поля приземной температуры в арктической области.

В безоблачном случае приземные температуры значительно ниже. Среднее квадратическое отклонение, рассчитанное по данным температуры в безоблачный период, составляет 4,3 °С. Для облачной атмосферы СКО — 6,4 °С.

**Рис. 8. Пространственно-временное распределение температуры воздуха на уровне 2 м для СП-36: а) безоблачный период, 139,3° з.д.; б) облачный период, 134,9° з.д.**



## Выводы

Результаты численных экспериментов, проведенных с полярной версией модели WRF, заметно ближе к натурным наблюдениям в сравнении со стандартной версией. Абсолютные ошибки сравнимы с ошибками в средних широтах.

Приземные характеристики — температура, относительная влажность и скорость ветра — прогнозируются лучше при увеличении пространственного разрешения в модели от 7 до 2 км. В случаях облачной атмосферы ошибки прогноза этих характеристик больше, чем в безоблачной.

Характер вертикальных профилей температуры, влажности и скорости ветра, полученных в прогнозах, близок к наблюдаемому.

Таким образом, получены результаты, которые в дальнейшем могут улучшаться при совершенствовании описания условий на поверхности Северного Ледовитого океана и энергообмена между подстилающей поверхностью и арктической атмосферой.

## Список литературы

1. *Fels S.B., Schwarzkopf M.D.* The simplified exchange approximation: a new method for radiative transfer calculations // *J. of Atmos. Sci.* — Vol. 32, N 7. — P. 1475–1488.
2. *Fie C., LeMone M., Tewari M.* An observation and Modeling Study of Characteristics of boundary layer structures.
3. *Janjic Z.I.* The step-mountain coordinate: physical package // *Mont. Weather Rev.* — 1990. — Vol. 118, N 7. — P. 1429–1443.
4. *Janjic Z.I.* The surface layer in the NCEP Eta model. Eleventh Conference on Numerical Weather Prediction, Norfolk, VA, 1996, 19–23 August; Amer. Meteor. Soc., Boston, MA. — 1996. — P. 354–355.
5. *Janjic Z.I.* Nonsingular Implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model // NCEP Office Note. — 2002. — N 437. — 61 p.
6. *Mellor G.L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Rev. Geophys. Space Phys.* — 1982. — Vol. 20. — P. 851–875.
7. *Morrison H., Curry J.A., Khvorostyanov V.I.* A new double-moment microphysics parameterization for application in cloud and climate models. Part I: Description // *J. of Atmos. Sci.* — 2005. — Vol. 62. — P. 1665–1677.
8. *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. Submitted to // *Mont. Weather Rev.* — 2008.

9. *Rodgers C.D.* Some extensions and applications of the new random model for molecular band transmission. *Quart // J. Roy. Meteor. Soc.* — 1968. — Vol. 94. — P. 99–102.

10. *Roberts R.E., Selby J.E.A., Biberman L.M.* Infrared continuum absorption by atmospheric water-vapor in 8–12 $\mu$ m window // *Applied Optics.* — 1976. — Vol. 15(9). — P. 2005–2090.

11. *Schwarzkopf M.D., Fels S.B.* Improvements to the algorithm for computing CO<sub>2</sub> transmissivities and cooling rates // *J. Geophys. Res.* — 1985. — Vol. 90 (ND 6). — P. 541–550.

12. *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 (D 5). — P. 9075–9096.