

ВЕРИФИКАЦИЯ ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА NCEP/NCAR ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ НА ДРЕЙФУЮЩИХ СТАНЦИЯХ «СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС»

канд. физ.-мат. наук М.Ю.КУЛАКОВ, д-р физ.-мат. наук А.П.МАКШТАС,
канд. физ.-мат. наук С.В.ШУТИЛИН

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: mod@aari.ru

В работе приводятся результаты сравнения метеорологических данных из архива NCEP/NCAR, полученных в результате реанализа, с данными наблюдений, полученными на дрейфующих станциях СП в Центральной Арктике в период с 1954 по 2006 г. Численные эксперименты, выполненные с использованием одномерной термодинамической модели морского льда, показали, что равновесная толщина льда, полученная с использованием данных СП, в два раза выше, чем при использовании данных NCEP/NCAR. Основными причинами этого являются завышенные по данным реанализа значения удельной влажности и температуры воздуха в летний период.

Ключевые слова: реанализ NCEP/NCAR, дрейфующая станция, атмосферное давление, ветер, температура воздуха, влажность, облачность, термодинамическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

Для успешного моделирования составляющих ледово-гидрологического режима Северного Ледовитого океана решающее значение имеют метеорологические данные, используемые в качестве атмосферного форсинга. Несомненно, что концентрация и толщина морского льда являются критическими параметрами при моделировании. Они регулируют скорость дрейфа и характеристики тепло-массообмена между атмосферой и океаном. Небольшие ошибки в параметрах морского льда, вытекающие из ошибок в атмосферном форсинге, могут перевести к серьезным ошибкам при вычислении других характеристик состояния океана. Это наглядно продемонстрировали авторы работы [Hunke, Holland, 2007], которые сравнили результаты моделирования на глобальной модели лед–океан, полученные с помощью трех разных наборов данных, для оценки их возможного использования при исследовании ледово-гидрологического режима акваторий Северного Ледовитого океана. Было показано, что при расчете на 20 лет относительно небольшие изменения в атмосферном форсинге приводят к значительным расхождениям в результатах моделирования. Причем эти расхождения наблюдались не только на поверхности, но и в глубоких слоях океана. Например, направление распространения слоя атлантических вод зависит от использованного варианта атмосферного форсинга. Если использовать аналогию с механизмом обратной связи «альbedo – состояние ледяного покрова», эта ситуация может быть определена как действие механизма обратной связи «ошибки форсинга – морской ледяной покров», обуславливающее существенное влияние небольших ошибок в атмосферном форсинге на результаты моделирования.

Работа [Hunke, Holland, 2007] является примером исследования чувствительности результатов моделирования к разным наборам данных, описывающих атмосферный форсинг. Следует отметить, что основные рекомендации этой работы не являются универсальными. Они в основном относятся только к конкретной модели, потому что другие модели могут по-иному реагировать на ошибки внешнего форсинга, что обусловлено их индивидуальными особенностями реализации и используемыми параметризациями. Основной целью нашего исследования является оценка величин возможных ошибок в данных одного из наиболее популярных архивов NCEP/NCAR, который часто используется в качестве атмосферного форсинга при моделировании ледово-гидрологических условий Северного Ледовитого океана, путем их сравнения с данными метеорологических наблюдений в Центральном Арктическом бассейне и оценка роли этих ошибок при моделировании термодинамических процессов, обуславливающих рост и таяние морского льда.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИХ ВЕРИФИКАЦИИ

Для анализа из архива NCEP/NCAR Reanalysis 1 (далее R1) [Kalney et al., 1996; Kistler et al., 2001] были выбраны ежедневные поля следующих метеорологических параметров: давление на уровне моря, температура воздуха на высоте 2 м, ветер на высоте 10 м, балл общей облачности и удельная влажность воздуха. Горизонтальное разрешение выбранных полей, за исключением температуры воздуха, составляет $2,5 \times 2,5^\circ$ по широте и долготе. Поля температуры воздуха представлены на сетке Гаусса, которая имеет несколько лучшее разрешение – $1,875^\circ$ по долготе и переменный шаг по широте, но примерно такой же величины.

Для верификации ежедневные данные из R1 были сопоставлены с осредненными на основе данных четырехсрочных или восьмисрочных метеорологических наблюдений, выполненных на дрейфующих станциях «Северный полюс» (СП) за период с 1954 по 2006 г., среднесуточными данными. Температура воздуха и относительная влажность воздуха измерялись на СП на высоте 2 м. Параметры приземного ветра были взяты или непосредственно из наблюдений на высоте 10 м, или, если ветер измерялся на других высотах, его значения пересчитывались на высоту 10 м в предположении логарифмического профиля скорости ветра. Балл общей облачности оценивался на СП визуально.

В период с 1954 по 1991 г. и с 2003 по 2006 г. каждый год в Северном Ледовитом океане работало от одной до трех станций СП. Траектории дрейфа всех станций СП, данные наблюдений которых были использованы в работе, представлены на рис. 1. Суммарно на всех станциях СП в период исследований было выполнено более чем 100 000 наблюдений за каждым из рассматриваемых в данной работе параметров. Для сопоставления данных СП и R1 последние интерполировались в конкретные точки местоположения станций СП методом триангуляции из четырех ближайших точек сеточной области. Полученные ряды были подвергнуты статистической обработке, как за весь период наблюдений, так и за три интервала:

- 1954–1977 гг. – период, в течение которого в реанализе не использовалась спутниковая информация и данные дрейфующих буев по программе IABP;
- 1978–1991 гг. – период, когда данные буев программы IABP и данные спутниковых наблюдений начали использоваться для более корректного описания полей метеорологических параметров;
- 2003–2006 гг. – период, отражающий современное состояние климата арктической системы.

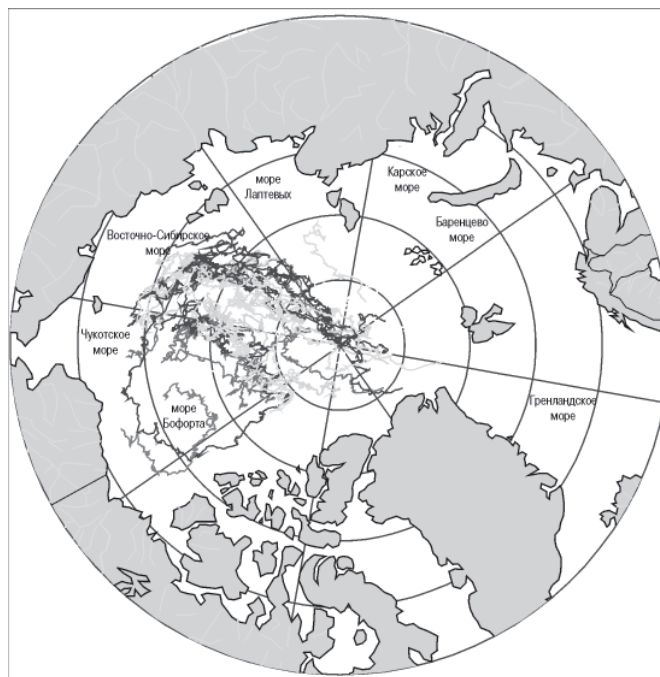


Рис. 1. Траектории дрейфа станций «Северный полюс» в Центральном Арктическом бассейне за период с 1954 по 2006 г., данные которых были использованы в работе.

Результаты сравнительного анализа и их обсуждение

Синхронизированные во времени и совмещенные в пространстве ряды данных наблюдений и результатов реанализа позволяют их легко сравнивать. Для выявления систематических ошибок по данным наблюдений на СП и данным R1 за период с 1954 по 2006 г. были рассчитаны средние для каждого дня года значения метеорологических параметров. На рис. 2 приведены сезонные изменения рассчитанных таким образом параметров, а в табл. 1 представлены результаты статистической обработки синхронизированных рядов данных, показывающие средние ошибки R1, их стандартные отклонения и коэффициенты корреляции между данными СП и R1 с детализацией по сезонам года.

Давление

Как видно из рис. 2а и таблицы приземное давление воздуха наиболее адекватно воспроизводится R1. Коэффициент корреляции порядка 0,99 для всех трех выделенных периодов и сезонов года. Средняя ошибка не превышает 1,5 гПа. Максимальная она зимой. Однако для всех сезонов года она отрицательная, что свидетельствует о том, что в R1 содержится некая незначительная систематическая ошибка.

Температура воздуха

В воспроизведении температуры приземного слоя воздуха также наблюдается систематическая ошибка. При этом качество данных реанализа сильно зависит от сезона (рис. 2б). Зимой, в период полярной ночи, корреляция между обоими рядами данных достаточно тесная (0,83) и величина средней ошибки не превышает 0,9 °С. В весенний период данные R1 завышают температуру воздуха более чем на 2,5 °С.

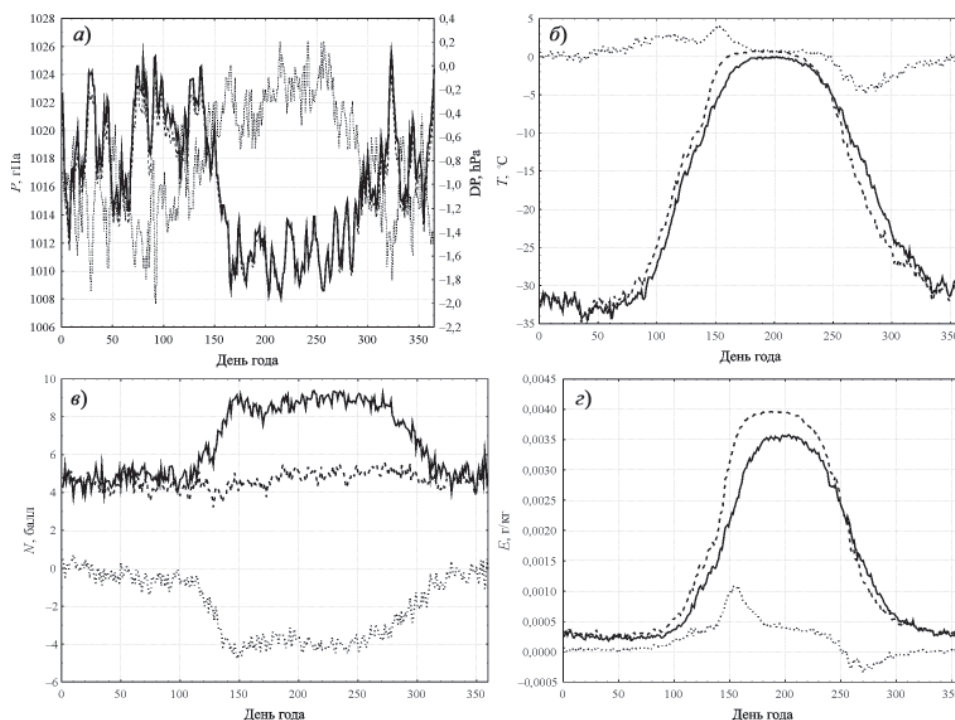


Рис. 2. Средние за период с 1954 по 2006 г. ежедневные значения давления на уровне моря (а), приземной температуры воздуха (б), облачности (в) и удельной влажности (г) по данным наблюдений на СП и данным R1.

Данные СП – сплошные линии, данные R1 – пунктир, разности между данными реанализа и СП – точки.

При этом большая величина коэффициента корреляции, более 0,92, во многом определяется для данного периода положительным сезонным ростом температуры. Летом ошибка в температуре воздуха несколько уменьшается (до 1,1–1,3 °C), однако коэффициент корреляции становится существенно меньше – не более 0,64. Осенью, наоборот, температура воздуха по данным R1 значительно ниже наблюдаемой, их разница составляет до –2,6, а коэффициент корреляции возрастает до величины 0,90, что, как и для весны, определяется сезонным ходом.

Как следует из таблицы, существенных различий в качестве данных R1 за периоды 1954–1977, 1978–1991 и 2002–2005 гг. не выявлено. Это свидетельствует, во-первых, о том, что качество расчетов от использования информации спутников и дрейфующих буев не улучшилось; и, во-вторых, что полученные статистические оценки качества расчетов устойчивы и имеют систематический характер. При проведении климатического моделирования можно рекомендовать при применении реанализа NCEP/NCAR в качестве атмосферного форсинга использовать полученные в данной работе достаточно устойчивые значения ошибок для корректировки данных.

Облачность

Рисунок 2в и таблица показывают, что облачность воспроизводится реанализом R1 абсолютно неадекватно во все сезоны года и для всех анализируемых периодов, как до появления спутников, так и в последние годы. Однако для зимнего периода

Таблица

**Характеристики качества данных реанализа NCEP/NCAR
для Центрального Арктического бассейна**

Период наблюдений	1954–1977 гг., C_e /СКО (r)	1978–1991 гг. C_e /СКО (r)	2003–2006 гг. C_e /СКО (r)
Давление на уровне моря			
Зима	–1,4/1,8 гПа (0,995)	–1,1/2,1 гПа (0,992)	–0,6/1,9 гПа (0,990)
Весна	–0,9/1,6 гПа (0,991)	–1,0/1,7 гПа (0,989)	–0,6/1,3 гПа (0,993)
Лето	–0,2/1,4 гПа (0,990)	–0,3/1,5 гПа (0,988)	–0,0/1,3 гПа (0,990)
Осень	–0,8/1,5 гПа (0,994)	–0,6/1,9 гПа (0,991)	–0,3/1,4 гПа (0,990)
Температура воздуха на высоте 2 м			
Зима	0,2/4,3 °C (0,83)	0,5/4,3 °C (0,81)	0,9/4,3 °C (0,82)
Весна	2,5/3,6 °C (0,92)	2,3/3,4 °C (0,93)	2,0/2,3 °C (0,97)
Лето	1,2/1,9 °C (0,55)	1,1/1,3 °C (0,53)	1,3/1,3 °C (0,64)
Осень	–2,6/4,5 °C (0,90)	–1,8/4,2 °C (0,92)	–1,7/3,8 °C (0,92)
Удельная влажность			
Зима	0,03/0,15 г/кг (0,82)	0,05/0,16 г/кг (0,82)	0,04/0,19 г/кг (0,81)
Весна	0,39/0,46 г/кг (0,90)	0,35/0,39 г/кг (0,92)	0,35/0,44 г/кг (0,95)
Лето	0,48/0,45 г/кг (0,59)	0,50/0,43 г/кг (0,56)	0,51/0,36 г/кг (0,61)
Осень	–0,11/0,41 г/кг (0,89)	–0,04/0,38 г/кг (0,92)	–0,08/0,35 г/кг (0,91)
Облачность			
Зима	10/41 % (0,42)	–11/39 % (0,36)	–10/37 % (0,49)
Весна	–21/43 % (0,33)	–24/39 % (0,35)	–34/40 % (0,30)
Лето	–38/32 % (0,30)	–40/31 % (0,34)	–46/33 % (0,20)
Осень	–21/41 % (0,35)	–26/34 % (0,38)	–24/36 % (0,40)
Скорость ветра на высоте 10 м			
Зима	–0,1/1,9 м/с (0,75)	0,5/2,1 м/с (0,71)	–0,3/2,1 м/с (0,77)
Весна	0,2/1,7 м/с (0,73)	0,5/1,7 м/с (0,73)	0,0/1,8 м/с (0,76)
Лето	0,4/1,7 м/с (0,74)	0,8/1,7 м/с (0,73)	0,8/1,8 м/с (0,68)
Осень	0,2/2,0 м/с (0,74)	0,9/2,1 м/с (0,71)	0,3/2,2 м/с (0,68)

Примечание: В таблице C_e – средняя ошибка данных, СКО – среднее квадратическое отклонение ошибки, r – коэффициент корреляции между рядами данных СП и R1

можно отметить некоторое увеличение соответствия данных наблюдений и реанализа при осреднении. При этом интерес представляет выявленное в ходе работы приближение распределения повторяемости наблюденной облачности к нормальному при осреднении до 5 суток, что близко к характерному времени синоптических процессов. При таком осреднении параметры распределений становятся достаточно близкими, хотя коэффициент корреляции и не достигает величины 0,6. Учитывая данное обстоятельство, можно предложить использовать осредненные по указанному периоду данные NCEP для оценки радиационного форсинга зимой, что все-таки лучше, чем использование климатических данных. Очевидно, что использование климатических данных полностью игнорирует межгодовую изменчивость, которая, как следует из предварительного анализа, может достигать в зимние периоды 1–2 баллов.

Влажность воздуха

В принципе влажность измеряется в Арктике, за исключением летнего периода, с большой погрешностью. Однако с точки зрения процессов энергообмена с подсти-

лающей поверхностью наибольший интерес представляет именно летний период, когда поток скрытого тепла превышает поток явного и способствует охлаждению поверхности и, соответственно, замедляет таяние. Анализ показывает, что, несмотря на относительную близость средних значений, NCEP дает в основном завышение величины удельной влажности (рис. 2з), что, судя по модельным оценкам, приводит преимущественно к притоку скрытого тепла к верхней границе снежно-ледяного покрова, в отличие от охлаждения вследствие испарения по данным СП.

Ветер

Принятая в российской метеорологии система кодирования данных о ветре, а именно, использование буквенных обозначений направления ветра и налагающийся на нее субъективный человеческий фактор, приводят в результате к очень грубой дискретизации данных по направлению скорости ветра (рис. 3). Очевидно, что такие данные малопригодны для проведения оценки результатов реанализа NCEP. Проведение скользящего осреднения несколько исправляет ситуацию. Даже суточное осреднение позволяет получить довольно реалистичное распределение ветра по направлениям, но только для слабых ветров (менее 5 м/с), повторяемость которых высока. Для более редко повторяющихся сильных ветров требуется более длительное осреднение.

Сравнение осредненных данных позволяет нам сделать ряд осторожных выводов. Во-первых, как и следовало ожидать, ветер по данным NCEP несколько слабее наблюдаемого на СП (максимальный ветер 15,9 м/с против 18,0 м/с, средний модуль скорости ветра 2,3 м/с против 2,7 м/с). Во-вторых, по данным реанализа наблюдается некоторая асимметрия с преобладанием ветров западного направления (вектор средней ошибки составляет по модулю 0,5 м/с и по направлению 292°), в то время как по данным СП получается практически симметричная роза ветров, что представляется более реальным, поскольку значительные орографические особенности на дрейфующем льду отсутствуют. Корреляция данных о скорости ветра на СП и в NCEP достаточно высока. Так, коэффициент корреляции зональной составляющей при суточном осреднении равен 0,90, меридиональной 0,89, а модуля ветра 0,82. Для 5-суточного осреднения они несколько возрастают – 0,94, 0,91 и 0,89 соответственно. При увеличении периода осреднения коэффициенты корреляции уже не меняются.

Резюмируя все сказанное, можно заключить, что проведенное сравнение не выявило существенных ошибок в расчете ветра в NCEP и эти данные можно использовать в качестве форсинга при моделировании.

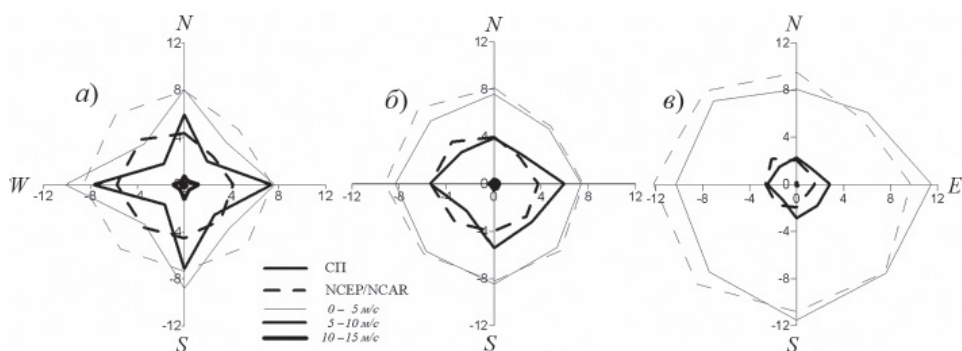


Рис. 3. Розы ветров по данным наблюдений на СП-22 и реанализа: а – по срочным данным и с применением скользящего суточного (б) и пятисуточного (в) осреднения.

Численные эксперименты

Для оценки чувствительности численных моделей к качеству атмосферных данных был произведен ряд численных экспериментов с термодинамической моделью морского льда [Makshtas et al., 1988]. В этих экспериментах в качестве форсинга задавались различные комбинации средних сезонных циклов атмосферного давления, температуры и влажности воздуха, облачности и скорости ветра, полученные в рамках данной работы по данным СП и R1. Результаты расчетов представлены на рис. 4. Как видно из рисунка, равновесная толщина льда при использовании форсинга R1 в два раза меньше, чем при использовании форсинга СП, и равновесие наступает уже через 10 лет, в то время как с форсингом СП для этого требуется более 30 лет.

В следующих более детальных экспериментах отдельные параметры атмосферного форсинга СП заменялись их аналогами из форсинга R1. Замена данных по ветру (кривая 4 на рис. 4) незначительно повлияла на результаты расчетов, что подтверждает наш вывод о достаточно высоком качестве воспроизведения ветра в реанализе.

Наибольшие расхождения в результатах расчетов наблюдаются при замене сезонного хода облачности по данным СП аналогичным из реанализа. Как видно из рис. 4, существенно заниженные по данным реанализа значения балла общей облачности (см. рис. 2в) приводят к существенному увеличению равновесной толщины льда. Более подробный анализ характеристик теплового баланса моделируемого ледяного покрова показал, что уменьшение балла облачности существенно увеличивает величину уходящего длинноволнового излучения подстилающей поверхности, которое не компенсируется соответственным увеличением приходящей солнечной радиации, поскольку в период ее максимальных значений альbedo снежно-ледяного покрова остается достаточно большим вследствие более позднего начала таяния, обусловленного упомянутым радиационным выхолаживанием.

Существенное уменьшение равновесной толщины льда при использовании в качестве температурного форсинга данных реанализа объясняется тем обстоятельством,

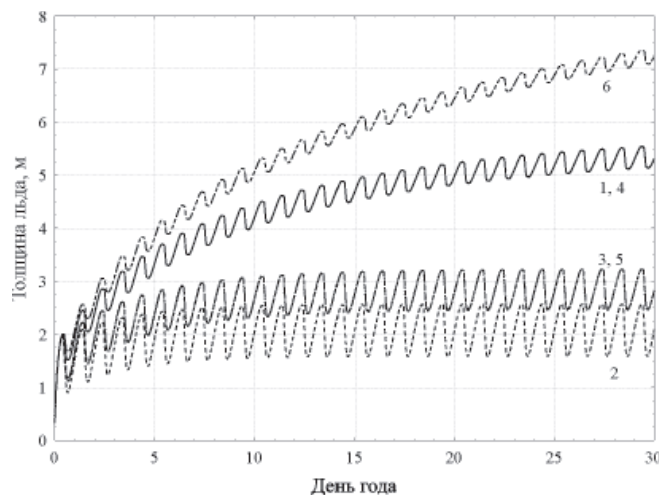


Рис. 4. Толщина льда по результатам модельных экспериментов с различными атмосферными форсингами: по данным осредненных метеорологических наблюдений на СП (1), по данным NCEP/NCAR (2), по данным СП с заменой данных по ветру (4), температуре (3), удельной влажности воздуха (5) и облачности (6) соответствующими данными из NCEP/NCAR.

что в летний период температура приледного слоя воздуха по данным R1 всегда существенно выше температуры снежно-ледяного покрова, соответствующей температуре таяния (0 °C). Это обуславливает постоянный приток явного тепла к поверхности и вызванное им интенсивное таяние, поскольку в этот период отрицательная обратная связь между длинноволновым радиационным балансом и турбулентным потоком явного тепла, описанная в работе [Makshtas et al., 1999], не реализуется вследствие фиксированной температуры таяния снега (льда).

Завышение по данным R1 удельной влажности воздуха также уменьшает равновесную толщину льда, поскольку обуславливает существенный приток скрытого тепла к поверхности снежно-ледяного покрова и усиливает механизм положительной обратной связи вследствие более раннего уменьшения величины альбеда подстилающей поверхности, обусловленного в свою очередь более ранним началом таяния.

ВЫВОДЫ

Приведены результаты сравнения данных реанализа NCEP/NCAR с данными наблюдений, выполненных на дрейфующих станциях СП в Центральной Арктике в период с 1954 по 2006 г., с целью верификации метеорологических данных, используемых при моделировании вод и льдов Северного Ледовитого океана.

Показана хорошая согласованность между данными NCEP/NCAR и наблюдаемым давлением на уровне моря. Относительно хорошее соответствие имеет место между наблюдаемым и рассчитанным ветром. Измеренная в ходе стандартных метеорологических наблюдений температура воздуха находится в хорошем согласии с данными реанализа только для зимнего периода. Осенью температура воздуха по данным NCEP/NCAR ниже, чем наблюдаемая, а весной – выше, чем измеренная на станциях СП. Летом температура воздуха из NCEP/NCAR на 1,2 °C выше, чем наблюдаемая. Удельная влажность воздуха и балл общей облачности плохо воспроизводятся по данным реанализа и не могут быть рекомендованы для использования в качестве внешнего форсинга.

Численные эксперименты, выполненные с использованием одномерной термодинамической модели морского льда, показали, что равновесная толщина льда, полученная с использованием данных СП, в два раза выше, чем при использовании данных NCEP/NCAR. При этом заниженные по данным реанализа значения балла общей облачности приводят к существенному увеличению модельной толщины льда, в то время как завышенные значения удельной влажности и температуры воздуха в летний период обуславливают интенсивное таяние в летний период.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» по Госконтракту № 16.420.12.0002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hunke E.C., Holland M.M. Global atmospheric forcing data for Arctic ice-ocean modeling // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. C04S14, doi:10.1029/2006JC003640.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. Vol. 77. P. 437–471.

Kistler R., Kalnay E., Collins W., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Ebisuzaki W., Kanamitsu M., Kousky V., van den Dool H., Jenne R., Fiorino M.. The NCEP-NCAR 50-Years Reanalysis: Monthly Mean CD-ROM and Documentation // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2001. Vol. 82. P. 247–268.

Makshtas A.P., Nazarenko L.S., Shoutilin S.V. Model of sea ice cover in the Arctic Basin, in Mathematical Models in Investigations of Ocean Dynamics (in Russian) / Edited by V.I.Kusin. Siberian Department of USSR Academy of Science, Novosibirsk, 1988. P. 96–116.

Makshtas A.P., Andreas E.L., Svyashennikov P.N., Timachev V.F. Accounting for clouds in sea ice model // Atmos. Res. 1999. Vol. 52. P. 77–113.

M.YU.KULAKOV, A.P.MAKSHTAS, S.V.SHOUTILIN

VERIFICATION OF THE NCEP / NCAR REANALYSIS DATA BY OBSERVATIONS AT THE DRIFTING STATION «NORTH POLE»

The paper presents the results of comparison the data of NCEP/NCAR reanalysis with data of observations executed at the drifting stations «North Pole» in the central Arctic during 1954–2006 years. Numerical experiments with one-dimensional thermodynamic sea ice model showed that the equilibrium ice thickness calculated using NP data twice higher than using the data of NCEP/NCAR. The main reasons are overestimated in reanalysis data about specific humidity and air temperature in the summer.

Keywords: NCEP/NCAR Reanalysis, drifting station, sea level pressure, wind, air temperature, humidity, cloudiness, thermodynamic model.