

## МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ОЖИДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА СЛО ПРИ АНТРОПОГЕННОМ ПОТЕПЛЕНИИ В XXI ВЕКЕ

С.В.ШУТИЛИН, А.П.МАКШТАС, Г.В.АЛЕКСЕЕВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

*Оценки возможных изменений ледовых условий в северной полярной области на период до 2100 года выполнены на основе разработанной в ААНИИ динамико-термодинамической модели морского льда и среднемесячных полей температуры приповерхностного слоя воздуха и приземного атмосферного давления, полученных из сценарных прогнозов увеличения концентрации углекислого газа А1В и В2 в ходе численных экспериментов на совместных моделях HadCM3 и ECHAM5. Расчеты по обоим сценариям показали близкие результаты как по распределению толщин, так и по сплоченности ледяного покрова. При этом в период максимального его развития обе характеристики, в общем, соответствуют имеющим место в настоящее время. Это обусловлено слабой чувствительностью ледяного покрова к изменениям температуры приземного слоя воздуха в зимний период вследствие наличия отрицательных обратных связей между физическими процессами, обуславливающими нарастание льда. Существенное отличие прогнозируемого состояния ледяного покрова от современного наблюдается в летний период, когда указанные обратные связи отсутствуют. Тем не менее, как следует из выполненных прогностических расчетов, даже к концу текущего столетия не следует ожидать возможности безледного плавания, особенно в Канадском секторе Арктики.*

Основой технологии для прогнозирования климатических изменений ледовых условий в Арктике на период до 2100 г. являются разработанная в ААНИИ динамико-термодинамическая модель морского льда [2, 6], валидированная по всем доступным данным, и поля изменений температуры приземного слоя воздуха и приземного атмосферного давления, полученные из сценарных прогнозов, связанных с увеличением концентрации парниковых газов. Эти сценарные прогнозы подготовлены в Главной геофизической обсерватории им. А.И.Воейкова на основе результатов по совместным моделям Хадлеевского Центра, Великобритания (HadCM3) и Института метеорологии им. Макса Планка, Германия (ECHAM5).

Использовались два сценария изменений климата – А1В и В2. Группа сценариев и сюжетных линий развития А1 описывает будущий мир, характеризующийся весьма быстрыми темпами экономического роста, сопровождающегося ростом численности населения Земли, пик которого придется на середину столетия, и которое затем будет постепенно сокращаться. Особенности развития будут являться сглаживание различий между регионами, создание экономического потенциала и активизация культурных и социальных взаимосвязей, а также существенное сокращение региональных различий в доходе на душу населения. Группа сценариев А1 подразделяется на три подгруппы, которые описывают альтернативные направления технологических изменений в системе энергетики, из них наибольший интерес представляет сценарий А1В, предполагающий сбалансированное использование различных источников энергии, как ископаемого топлива, так и альтернативных источников. Группа сценариев и сюжетных линий В2

описывает условия развития мира, в котором акцент сделан на локальных решениях проблемы экономической, социальной и экологической устойчивости. Это мир с постоянно растущей численностью общего населения Земли, темпы роста которого, однако, ниже, чем в случае сценариев группы А, промежуточными уровнями экономического развития и менее быстрым техническим прогрессом.

Основными уравнениями динамико-термодинамической модели морского льда являются: стационарное уравнение баланса импульса, квазистационарное уравнение сохранения энергии, описывающее тепловые процессы в ледяном покрове, и нестационарное уравнение баланса массы льда. В отличие от других моделей в использованной модели ледяной покров в каждой точке пространства описывается средней толщиной ровного льда, толщиной торосов, высотой снежного покрова и относительными площадями, занятыми ровным и всторошенным льдами, а также участками открытой воды. Кроме этого рассчитываются основные параметры взаимодействия атмосферы и океана: турбулентные и радиационные потоки тепла, поток тепла через снежно-ледяной покров, поток тепла от океана к нижней границе льда, обусловленный поглощенной в разводах солнечной радиацией, температуры верхней поверхности снежно-ледяного покрова, разводов и верхнего слоя океана, представленного в модели перемешанным слоем постоянной глубины. Модель имеет пространственное разрешение 50 км и интегрируется по времени методом крупных частиц с шагом 24 часа.

В качестве внешних параметров модели используются интерполированные в узлы сетки ежедневные данные о температуре приповерхностного слоя атмосферы

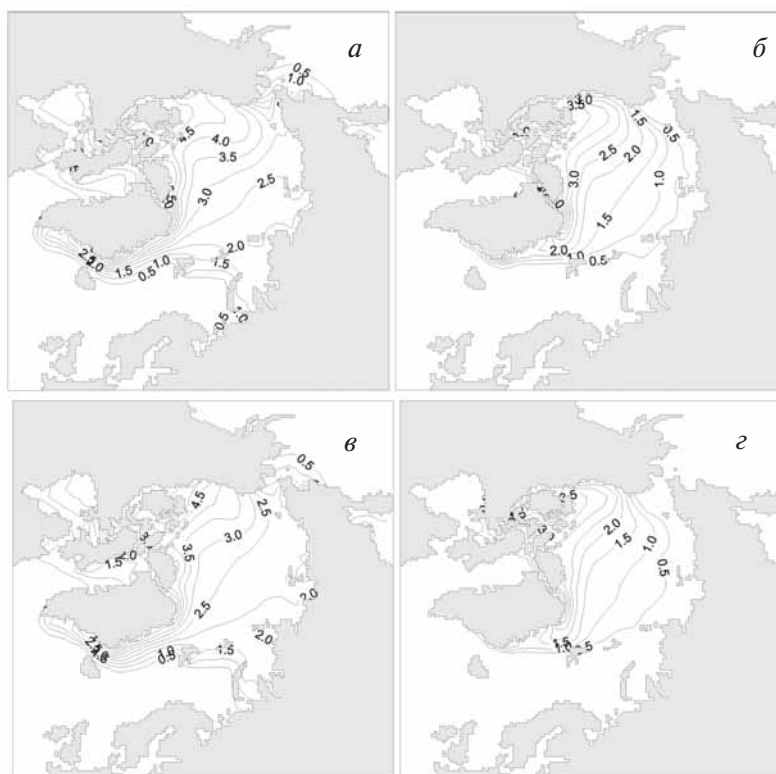


Рис. 1. Осредненное за 1980–2000 гг. (а, б) и за 2040–2060 гг. (в, г) пространственное распределение толщин ледяного покрова (м) в апреле (а, в) и сентябре (б, г)

и приземного атмосферного давления, а также приведенные в Атласе Северного Ледовитого океана [1] климатические значения балла общей облачности, интенсивности выпадения твердых осадков и относительной влажности воздуха. Поскольку модель не описывает адвективные процессы в океане, использована матрица постоянных потоков тепла от нижележащих слоев океана для районов Гренландского, Берингова и Баренцева морей, построенная на основе результатов совместной модели [4]. Валидация результатов моделирования изменчивости ледяного покрова за 1958–1997 гг. по максимально возможному набору доступных данных, выполненная в [6], показала, что она достаточно адекватно воспроизводит как сезонную, так и межгодовую изменчивость характеристик ледяного покрова, включая выявленное Ротроком и др. [7] значительное уменьшение толщины льда в начале 1990-х гг.

При прогнозе будущих возможных изменений характеристик ледяного покрова в качестве форсинга для модели использовались ежесуточные поля приповерхностной температуры воздуха и приземного давления за 1980–2000 гг., полученные из реанализа NCEP (текущий климат), и поля этих же характеристик, сконструированные с учетом их среднемесячных аномалий, полученных при расчетах по сценариям в моделях HadCM3 и ECHAM5. Результаты расчетов состояния ледяного покрова с использованием данных реанализа NCEP для текущего климата и сценария XXI века по модели HadCM3 приведены на рис. 1, 2.

Как видно из рисунков, пространственное распределение осредненных толщин и сплоченности ледяного покрова в 2040–2060 гг. в основном соответствует

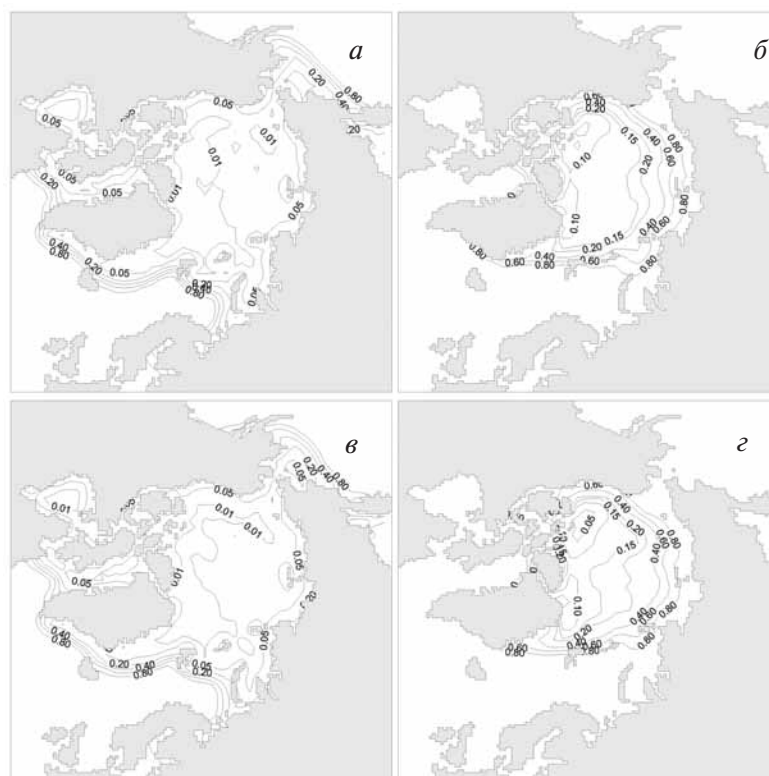


Рис. 2. Осредненное за 1980–2000 гг. (а, б) и за 2040–2060 гг. (в, г) пространственное распределение относительных площадей разводий в апреле (а, в) и сентябре (б, г)

Таблица 1

**Осредненные за 1980–2000, 2040–2060 и 2080–2100 гг. интегральные характеристики  
ледяного покрова в Северном Ледовитом океане,  
рассчитанные по сценарию А1В**

Годы	$V_{\max}$	$V_{\min}$	$Vr_{\max}$	$Vr_{\min}$	$S_{\max}$	$S_{\min}$
NCER 1980–2000	27,18	14,36	12,53	9,77	9,01	5,62
Had3 2040–2060	21,55 –20 %	8,10 –43 %	8,89 –29 %	5,55 –43 %	8,64 –4 %	3,97 –29 %
Had3 2080–2100	17,50 –36 %	5,12 –64 %	6,32 –49 %	3,42 –64 %	8,12 –10 %	3,35 –40 %
ЕНАМ 2040–2060	21,06 –23 %	5,89 –58 %	7,86 –37 %	4,44 –54 %	8,93 –1 %	3,30 –41 %
ЕНАМ 2080–2100	16,29 –40 %	2,10 –85 %	4,61 –63 %	1,60 –83 %	8,59 –5 %	1,45 –74 %
2007	26,08 –4 %	12,31 –14 %	12,45 –1 %	9,25 –5 %	8,79 –2 %	4,35 –22 %

Примечание:  $V$ ,  $Vr$  – интегральные объемы льда и торосов на акватории (в тысячах км<sup>3</sup>);  $S$  – площадь акватории, покрытой ледяным покровом, сплоченность которого превышает величину 0,15 (в млн км<sup>2</sup>). В последней строке таблицы приведены относительные разности между вторым и первым из исследованных периодов

распределению, наблюдаемому в настоящее время. Отметим хорошее соответствие последнего имеющимся натурным данным [3]. Практически во всем Северном Ледовитом океане произойдет, следуя сценарию, сравнительно небольшое уменьшение толщины льда (порядка 0,5 м) и некоторое увеличение количества разводий (на 5–10 % зимой и 20–40 % летом). При этом более подробный анализ показывает, что на акватории, примыкающей к Канадскому Архипелагу и Гренландии, количество разводий может даже уменьшиться. Последнее дает основание полагать, что оптимистические надежды использовать улучшение ледовых условий для коммерческого плавания Северо-Западным проходом вряд ли сбудутся, по крайней мере, на протяжении ближайших 50 лет.

В табл. 1 приведены интегральные характеристики ледяного покрова Северного Ледовитого океана, характеризующие текущее состояние (1980–2000 гг.) и прогнозируемые для середины и конца XXI века при расчетах по сценарию климата А1В в моделях HadCM3 и ECHAM5. Расчеты проводились по акваториям, на которых сплоченность ледяного покрова превышает величину 0,15 для каждого года, а затем осреднялись по исследуемому периоду. При этом максимальные и минимальные значения параметров для каждого года выбирались на основе анализа ежедневных значений. Как видно из анализа таблицы, уменьшения в объеме и площади льда в Арктике существенно различаются для зимнего и летнего периодов, причем эта разница демонстрируется каждой из использованных моделей. Для зимы это сокращение составляет 20–30 % к середине века и увеличивается до 40–60 % к концу XXI столетия. В летний же период при уменьшении площади и

Таблица 2

**Осредненные за 1980–2000 и 2040–2060 гг. интегральные характеристики ледяного покрова  
в Северном Ледовитом океане, рассчитанные по сценарию В2**

Годы	$V_{\max}$	$V_{\min}$	$Vr_{\max}$	$Vr_{\min}$	$S_{\max}$	$S_{\min}$
1980–2000	31,11	15,08	14,17	10,06	13,98	6,56
2040–2060	27,39	11,32	11,93	7,44	13,39	5,85
Различие в %	–12	–25	–16	–26	–4	–11

Примечание: обозначения те же, что в табл. 1

объема льда в 40–50 % к середине века, модель ЕНАМ прогнозирует более чем 80 % сокращение площади и объема льда к концу века, в то время как модель Had3 показывает 60 % уменьшение объема льда и лишь 40 % сокращение его площади.

Как видно из табл. 2 (последняя строчка показывает разницу между величинами из второй и первой строк таблицы, деленную на значение первой строки), при расчете климата по сценарию В2 площадь ледяного покрова сократится к середине века не более чем на 11 % по сравнению со 100 % по оценкам, приведенным в [7]. При этом наибольшее сокращение как площади, так и объема льда в СЛО произойдет летом, когда даже небольшое повышение температуры воздуха (до +0,3–+0,5 °С, следуя используемому сценарию) вызывает значительно более

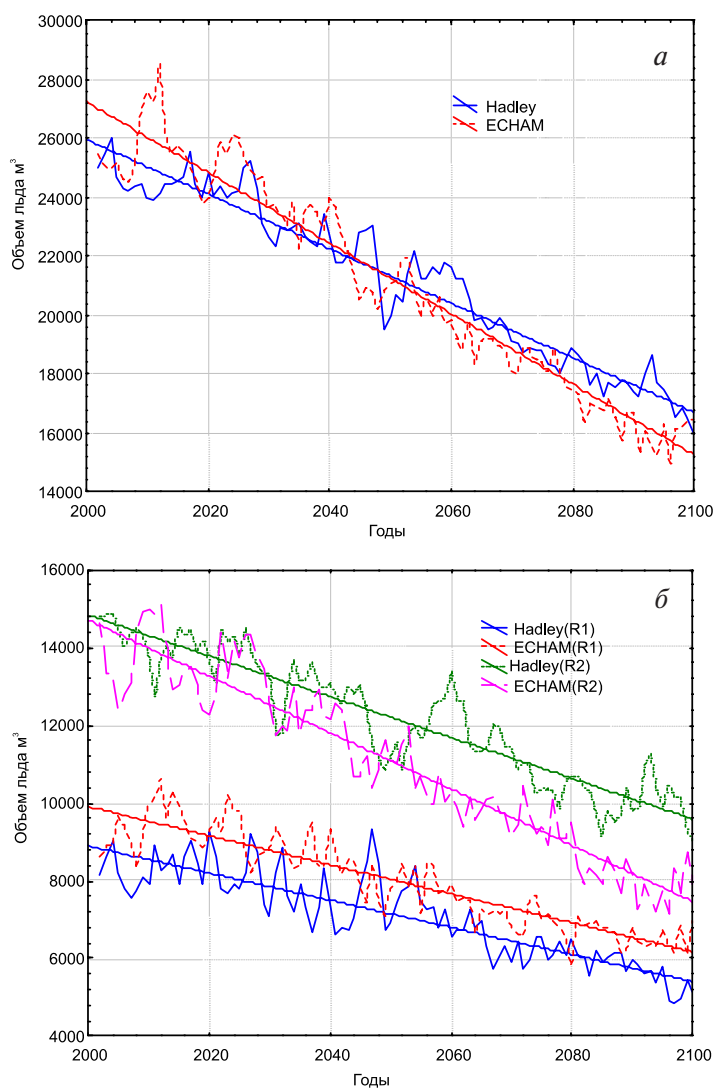


Рис. 3. Изменение объема льда в апреле в Северном Ледовитом океане (а), в Евразийском (R1) и Канадском (R2) суббассейнах (б)

существенное уменьшение ледяного покрова, чем повышение температуры зимой на 3–5 °С (тот же сценарий). Указанное различие было объяснено в работе [6] отсутствием отрицательной обратной связи между радиационными и турбулентными потоками летом. Из табл. 1 также следует, что основное уменьшение массы льда в СЛО произойдет вследствие уменьшения количества торосов.

На рис. 3, 4 приведены изменения интегральных характеристик морского ледяного покрова в Северном Ледовитом океане. Как видно из рис. 3, результаты расчетов по обоим сценариям показывают существенное, но практически одинаковое уменьшение объема морского льда в Северном Ледовитом океане после 2030 г. и значительные его колебания с периодом порядка двадцати лет. При этом уменьшение объема льда более существенно в Канадском суббассейне. Дополнительный анализ показывает, что соответствие изменений объемов льда обусловлено динамическими процессами в морском льду (процессами торошения).

Как видно из рис. 5–8, расчеты по обоим сценариям дают близкие результаты как по распределению толщин, так и по сплоченности ледяного покрова. При этом в

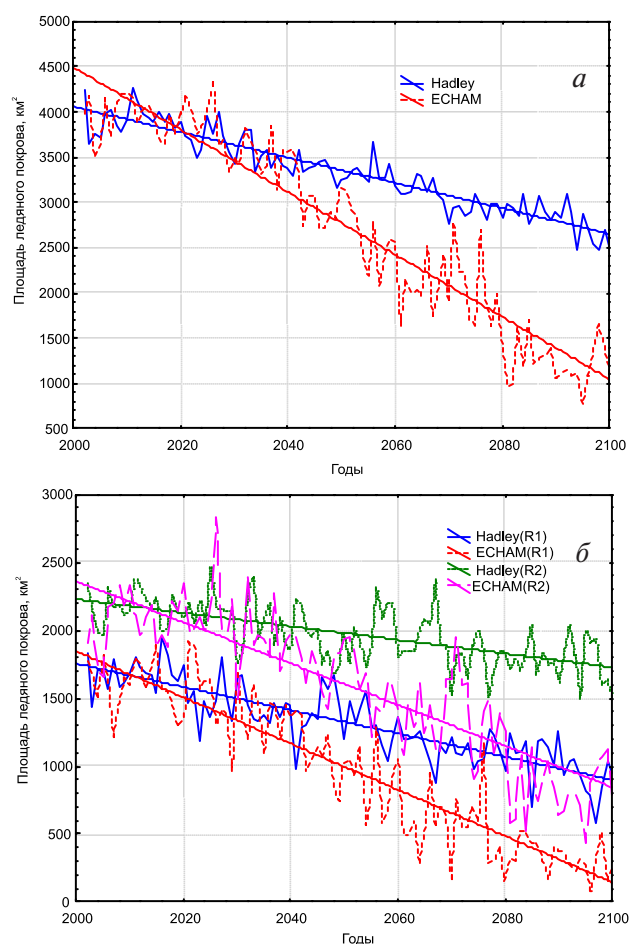


Рис. 4. Изменение площади льдов в сентябре в Северном Ледовитом океане (а) и в Евразийском (R1) и Канадском (R2) суббассейнах (б)

период максимального его развития обе характеристики морского ледяного покрова, в общем, соответствуют имеющим место в настоящее время (рис. 1, 2). Как уже было отмечено ранее, это обусловлено слабой чувствительностью ледяного покрова к изменениям температуры приземного слоя воздуха в зимний период вследствие наличия отрицательных обратных связей между физическими процессами, ответственными за нарастание льда. Существенное отличие прогнозируемого состояния ледяного покрова от современного состояния наблюдается в летний период, когда указанные обратные связи отсутствуют. Тем не менее, как это следует из выполненных по разработанной технологии прогностических расчетов, даже к концу текущего столетия не следует ожидать возможности безледного плавания, особенно Северо-Западным проходом.

В то же время модельные расчеты текущего состояния ледяного покрова на 2007 г. и реальные спутниковые данные показывают, что 2007 г. был рекордным по

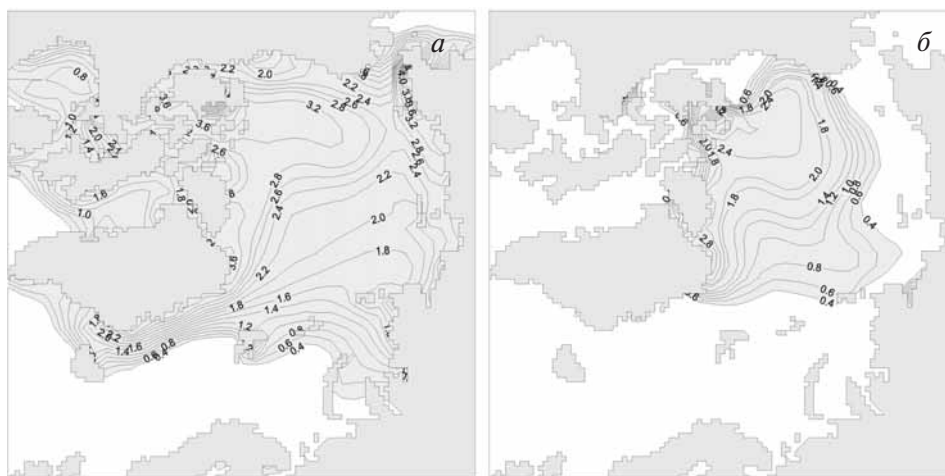


Рис. 5. Осредненное за 2080–2100 гг. пространственное распределение толщин ледяного покрова (м) в апреле (а) и сентябре (б) по модели HadCM3

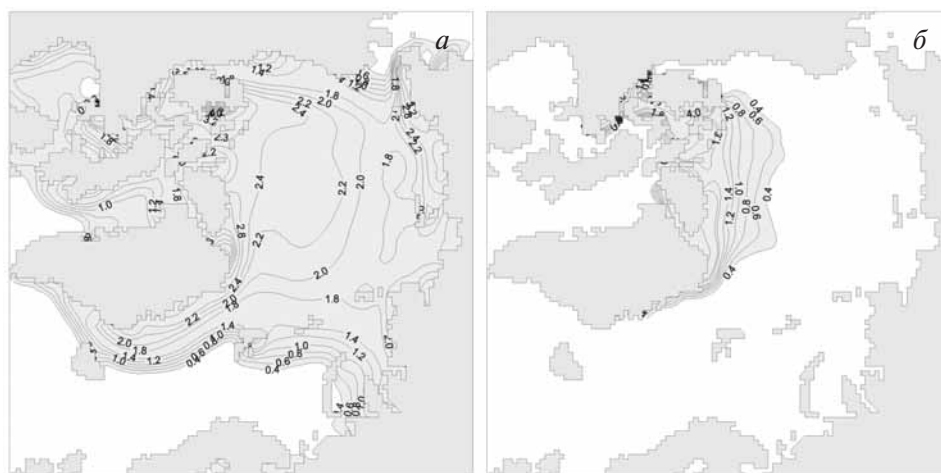


Рис. 6. Осредненное за 2080–2100 гг. пространственное распределение толщин ледяного покрова (м) в апреле (а) и сентябре (б) по модели ECHAM5

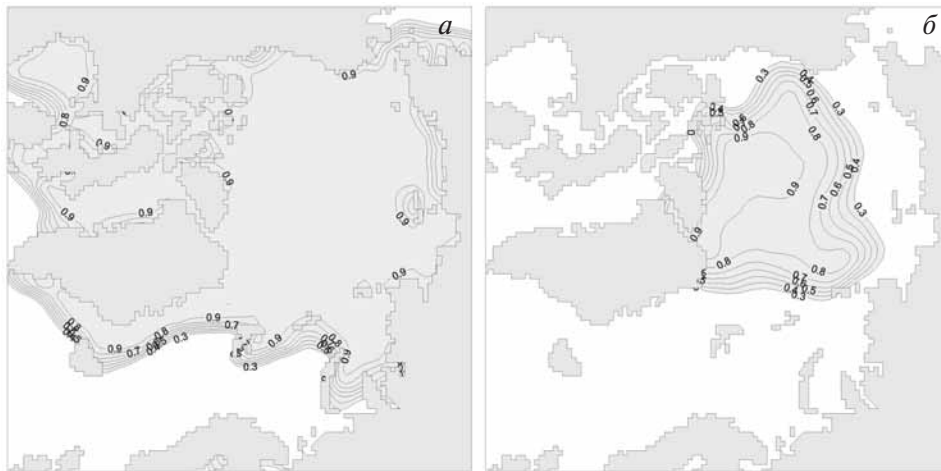


Рис. 7. Осредненное за 2080–2100 гг. пространственное распределение сплоченности ледяного покрова (м) в апреле (а) и сентябре (б) по модели HadCM3

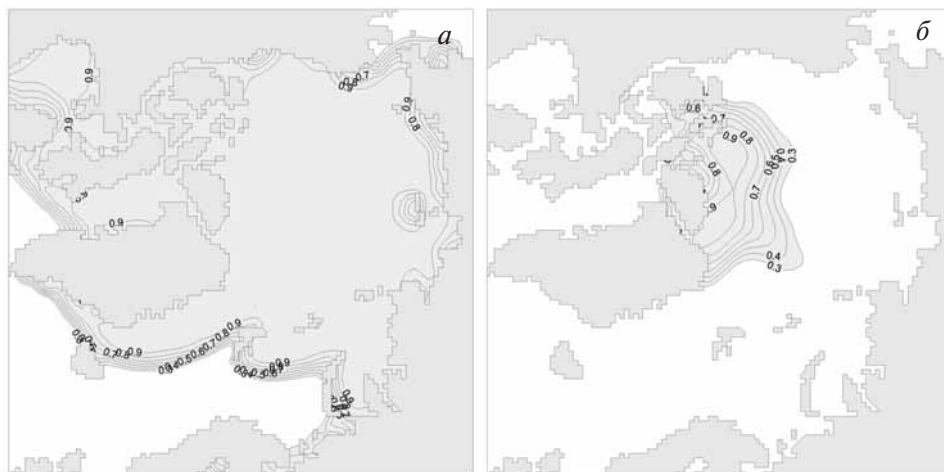


Рис. 8. Осредненное за 2080–2100 гг. пространственное распределение толщин ледяного покрова (м) в апреле (а) и сентябре (б) по модели ECHAM5/MPI

величинам сокращения ледяного покрова в летний период (рис. 9). Это свидетельствует о том, что реальное сокращение площади ледяного покрова в летний период превышает в настоящее время все, даже самые пессимистические прогнозы. При этом в летний период практически полностью очистились ото льда все шельфовые моря Сибирского шельфа. Благодаря интенсивному летнему прогреву за счет приходящей солнечной радиации произошло существенное повышение температуры верхнего слоя океана в этих районах до 6–8 °С. Как результат, ледообразование здесь началось значительно позже обычного времени, а в Чукотском море открытая вода сохранялась как в модели, так и по реальным данным до декабря.

В заключение следует отметить, что разработанная технология может быть применена, при некоторой модификации, к детальному анализу существующих и



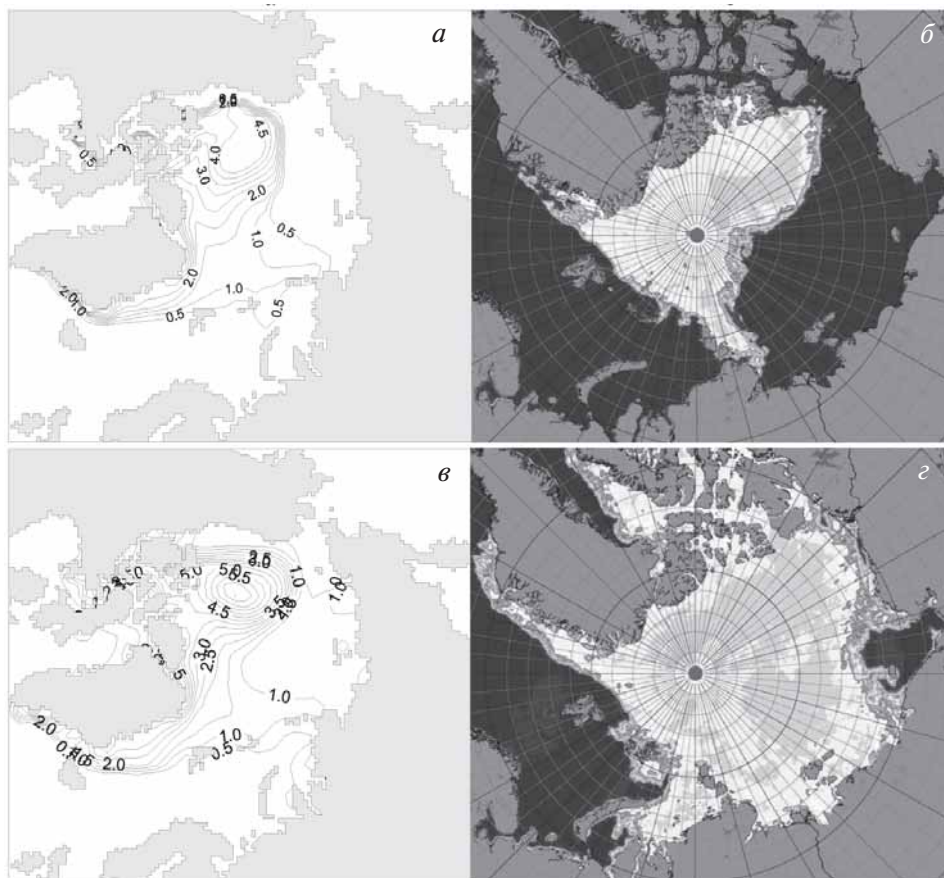


Рис. 9. Распределение толщин льда по модели и спутниковым данным в Северном Ледовитом океане в сентябре (а, б) и ноябре (в, г) 2007 г.

прогнозу будущих изменений ледовых условий конкретных районов Северного Ледовитого океана, в которых предполагается активная хозяйственная деятельность (навигация и добыча полезных ископаемых, в частности углеводородного сырья на шельфе арктических морей).

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 07-05-13558-офиц\_ц и 08-05-00124-а.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. М.: Изд. ВМФ СССР, 1980. 184 с.
2. Макутас А.П., Назаренко Л.С., Шутилин С.В. Модель морского ледяного покрова Арктического бассейна. Математические модели в исследовании динамики океана. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1988. С. 96–116.
3. Bourke R.H., McLaren A.S. Contour mapping of Arctic Basin ice draft and roughness parameters // J. Geophys. Res. 1992. Vol. 97. P. 17715–17728.

4. Hakkinen S., Mellor G.L. Modeling the seasonal variability of a coupled Arctic ice-ocean system // J. Geophys. Res. 1992. Vol. 97. P. 20285–20304.
5. Johannessen O.M., Miles M.W., Bengtsson L., Bobylev L.P., Kuzmina S.I. Arctic climate change // Arctic environment variability in the context of global change / Ed. L.P.Bobylev, K.Ya.Kondratyev, O.M.Johannessen. Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK, 2003. P. 1–14.
6. Makshtas A., Shoutilin S., Andreas E. Possible dynamic and thermal causes for the recent decrease in sea ice in the Arctic // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108. P. 25-1–25-13.
7. Rothrock D.A., Yu.Y., Maykut G.A. Thinning of the Arctic sea-ice cover // Geophys. Res. Lett. 1999. Vol. 26. P. 3469–3472.

*S.V.SHUTILIN, A.P.MAKSHTAS, G.V.ALEXEEV*

#### **MODELING ESTIMATIONS OF EXPECTED CHANGES OF ICE COVER IN THE ARCTIC UNDER ANTHROPOGENOUS WARMING IN XXI CENTURY**

*Estimations of possible changes of ice conditions in the Arctic basin till 2100 are executed on the basis of developed in AARI sea ice dynamic-thermodynamic model and monthly mean fields of air surface temperature and atmospheric pressure from numerical experiments with joint models HadCM3 and ECHAM5 under scenarios of atmospheric carbon dioxide increase A1B and B2. Calculations under both scenarios have shown the similar results about distributions of sea ice thickness and concentration. During the maximal development of sea ice cover in winter both characteristics in general correspond to having place now. It is explained by weak sensitivity of sea ice growth to changes of air surface temperature during winter due to presence of negative feedbacks. Essential difference of predicted sea ice conditions from modern is observed during summer, when such feedbacks are absent. Nevertheless, as follows from estimations, even to the end of XXI century it is not necessary to expect the opportunity of ice-free navigation, especially in the Canadian basin*