

Палеогляциология

УДК [551.513+551.583.7].001.572

Влияние Скандинавского ледника на климатические условия Восточно-Европейской равнины по данным численного моделирования проекта PMIP II

© 2014 г. П.А. Морозова

Институт географии РАН, Москва

*morozova_polina@mail.ru**Статья принята к печати 16 июня 2013 г.*

Изменение уровня Каспийского моря, климат Восточно-Европейской равнины, палеоклиматология, позднелайстоценовый криохрон, Скандинавский ледниковый щит, численное моделирование климата, PMIP.

Caspian sea level fluctuations, East-European Plain climate, LGM, numerical climate modeling, paleoclimatology, PMIP, Scandinavian ice sheet.

Рассматриваются результаты работы глобальных климатических моделей, участвующих в проекте PMIP 2 (Paleoclimate Modelling Intercomparison Project), по воспроизведению современного климата и климата последнего ледникового максимума (LGM) для территории Восточно-Европейской равнины. Приводится набор возможных критериев для оценки качества воспроизведения современного климата в этом регионе, выполнено сравнение моделей. Для климата LGM проанализированы поля температуры, осадков, рассчитан сток р. Волга без и с учётом возможного вклада талых вод Скандинавского ледника. Полученные результаты использованы для оценки уровня Каспийского моря в этот период.

Палеоклиматологические исследования играют важную роль в развитии климатического прогноза и решении задач эволюционной географии. Изучение климатов прошлого должно основываться на синтезе палеогеографических реконструкций и численного моделирования. В теории климата моделирование имеет особое значение и служит основным методом, поскольку возможность натуральных исследований климатического режима даже на локальном уровне, не говоря уже о глобальном, ограничена. Основные климатообразующие факторы в масштабах инструментальных наблюдений достаточно стабильны, однако для изучения реакции элементов системы необходимо их изменение, которое не раз возникало в истории Земли. Это позволяет использовать данные палеорекострукций при численном моделировании прошлого как в качестве начальных данных, так и для сравнения полученных результатов. С одной стороны, проверяется качество работы модели, а с другой, что немаловажно, гипотезы изменения климата, чувствительности системы и её элементов к вариациям различных параметров. По сути, данные моделирования могут служить физическим обоснованием тех или иных теорий, а также инструментом согласования палеоданных.

Проект PMIP

За последние 20 лет в рамках крупнейшей международной инициативы Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI) [14] реализуются проекты, основная цель которых — диагностика качества работы ведущих климатических моделей. В их число входит и проект PMIP [15], направленный на воспроизведение климатов прошлого (контрастных эпох: оптимума голоцена и позднего плейстоцена (Last Glacial Maximum (LGM))). Первая стадия проекта PMIP стартовала в 1991 г. В настоящее время практически завершена вторая стадия (PMIP II) и начата третья, однако пока не все результаты моделирования PMIP III доступны, поэтому в настоящей работе используются данные второй стадии проекта. В проекте PMIP II ставились две основные задачи: 1) изучение климатов прошлого как ключ к пониманию связей в климатической системе и, следовательно, к прогнозированию её развития в будущем; 2) независимое испытание надёжности и качества моделей общей циркуляции.

Общая схема выглядит следующим образом. Существует «базовый», или тестовый, эксперимент, в котором задаются соответствующие граничные условия. Модель интегрируется на некоторый период времени, до наступления так

Таблица 1. Граничные условия в численных экспериментах РМIP II

Граничные условия	«Базовый» эксперимент ¹	21 тыс. л.н. (LGM)
Растительность	Фиксированная	Такая, как в «базовом» эксперименте
Ледяной покров	Современный	Заданы по результатам реконструкций ICE-5G ²
Топография, береговая линия	Современные	
Первоначальное состояние океана	Современное (Levitus, 1998 ³)	Данные палеорекоkonструкций («холодный океан», [climap]) или современное состояние (Levitus, 1998 ³)
Солнечная постоянная	1365 Вт/м ²	1365 Вт/м ²
Параметры орбиты ⁴	$e = 0,016724$; $\varepsilon = 23,446$; $\omega = 02,04$	$e = 0,018994$; $\varepsilon = 22,949$; $\omega = 114,42$
Парниковые газы ⁵	CO ₂ – 280 ppm; CH ₄ – 760 ppm; CFC – 0 ppm; N ₂ O – 270 ppm; O ₃ – 10 DU	CO ₂ – 185 ppm; CH ₄ – 350 ppm; CFC – 0 ppm; N ₂ O – 200 ppm; O ₃ – 10 DU

¹«Базовый» эксперимент – тестовый и направлен на воспроизведение современного климата; ²ICE-5G – реконструкция ледяного покрова [21]; ³Levitus, 1998 – распределение температуры и солёности по данным NODC (National Oceanographic Data Center); ⁴параметры орбиты: e – эксцентриситет орбиты, ε – угол наклона плоскости экватора к плоскости орбиты, ω – гелиоцентрическая долгота перигелия; ⁵парниковые газы – концентрация в воздухе, ppm (число частиц на миллион); при моделировании современного климата задаётся доиндустриальный.

Таблица 2. Список моделей РМIP II, результаты которых анализируются в данной работе

Модель	Организация, автор или страна	Разрешение модели*
ECBILTCLIO	Renssen, Fichet	64 × 32
CNRM	Centre National de Recherches Meteorologie, Франция	128 × 64
FGOALS	Yongqiang Yu, Китай	128 × 60
HADCM	Hadley centre climate model., Великобритания	96 × 73

*Число узлов широтно-долготной сетки.

называемого «стационарного» режима (т.е. климатических условий, характерных для данных граничных условий), в результате чего должны получиться поля метеорологических величин, характеризующие климат выбранного периода. Затем граничные условия меняются, в результате происходит «возмущение» климатической системы, и изучается её реакция на изменение внешних факторов. В РМIP в качестве «базового» выступает климат доиндустриальной эпохи, а в качестве «возмущённого» – климат оптимума голоцена (6 тыс. л.н.) и климат позднего плейстоцена (21 тыс. л.н.). Эти эпохи выбраны как наиболее контрастные и максимально обеспеченные данными палеорекоkonструкций. Граничные условия для рассматриваемых в данной работе экспериментов приведены в табл. 1. Для позднего плейстоцена к определяющим факторам относятся: наличие покровного оледенения; более низкая температура океана; изменение соотношения «суша–море» в результате падения уровня Мирового океана.

В проекте РМIP II представлены так называемые «совместные» (coupled) модели «атмосфера–океан» и «атмосфера–океан–растительность». Всего в эксперименте по воспроизведению климата LGM участвовало восемь моделей, но только для четырёх были представлены все необходимые поля

для оценки режима увлажнения Восточно-Европейской равнины. В табл. 2 приведён список моделей, использованных в данном исследовании.

Климатические условия Восточно-Европейской равнины

До того, как мы приступим к анализу изменения климата Восточно-Европейской равнины в эпоху LGM, оценим качество воспроизведения моделями доиндустриального климата.

Методика оценки климатических моделей. В настоящей работе выполнена региональная оценка результатов работы моделей общей циркуляции атмосферы (МОЦА), приведённых в табл. 2, для территории, выбранной в пределах Восточно-Европейской равнины и представляющей собой прямоугольную область с границами 40–60° с.ш. и 30–60° в.д. (далее она будет называться «тестовой» областью). Оценивались температура воздуха и количество осадков путём их сопоставления с данными гидрометеостанций (ГМС), а также средний многолетний объём стока р. Волга в замыкающем створе. Классическая валидация климатических моделей предполагает оценку приземных характеристик «модель минус климат» и таких статистических характеристик, как пространственная дисперсия и корреляция. Сопоставляются также модельная и ре-

альная функции распределения метеорологических величин в конкретных точках или областях. В данном случае к «климату» относили измерения непосредственно на ГМС, осреднённые за период 1881–1930 гг. Подобный выбор объясняется, во-первых, попыткой максимально приблизить условия наблюдений к граничным условиям модели, т.е. к доиндустриальному климату. Во-вторых, предполагается, что за 50-летний отрезок атмосфера проходит весь спектр короткопериодических колебаний, формируя фоновые климатические значения.

Всего на Восточно-Европейской равнине расположено 17 станций с рядами наблюдений за 1881–1930 гг. (рис. 1). Данные моделирования интерполировались в точки станций. Тестовая область, площадь которой составляла около 2,8 млн км², была разбита на три относительно однородных с точки зрения физической географии региона (см. рис. 1). Так, «регион 1» представляет собой таёжную и лесотундровую область Европейской территории России; «регион 2», в основном, состоит из смешанных и широколиственных лесов Белоруссии и Украины, лишь на крайнем юге присутствует степная зона; «регион 3» – это степи и лесостепи Поволжья и только на севере захватывается таёжная зона. Все они – достаточно большие и одинаковые по площади, что позволяло минимизировать ошибку, а также равномерно обеспечены данными наблюдений: в каждую область входило 4–6 ГМС с рядами наблюдений за 1880–1930 гг. Оценки результатов моделирования велись как в среднем по всей территории Восточно-Европейской равнины, так и по выбранным регионам. Исходя из целей данного исследования, определены пять критериев оценок. Рассмотрим их по порядку.

1. Для среднегодовой температуры воздуха естественная межгодовая изменчивость на Восточно-Европейской равнине составляет $\pm 0,7$ °C (1σ), а $\pm 1,5$ °C соответствует аномальной изменчивости (2σ). Поэтому считалось, что если разница между модельной и реальной среднегодовыми температурами по модулю превышает 1,5 °C, то воспроизведение температурного режима моделью неадекватно; если разница лежала в пределах $1,5 \div 0,7$ °C, то удовлетворительно; если разница была менее 0,7 °C, то воспроизведение считалось успешным [17].

2. Если разница между модельной и реальной амплитудами годового хода температуры не превышала по модулю 2 °C, то принималось, что модель адекватно воспроизводит годовой ход температуры.

3. Для годовой суммы осадков критической обозначена величина ошибки в 15% среднего зна-

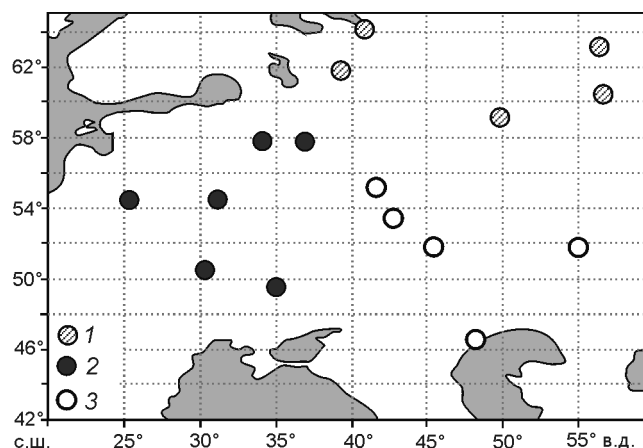


Рис. 1. Расположение гидрометеостанций на территории Восточно-Европейской равнины, данные которых использованы при валидации моделей:

1 – регион 1; 2 – регион 2; 3 – регион 3

Fig. 1. Location of the meteorological stations, which using for validation PMIP's model-data:

1 – region 1; 2 – region 2; 3 – region 3

чения по всей территории Восточно-Европейской равнины. Данная величина выбрана по следующим соображениям: с одной стороны, согласно исследованию [5], отклонение, превышающее 10%, вызывает значительные ошибки при подсчёте стока, с другой – сама точность измерения осадков на ГМС в выбранный период была невысокой. Например, различия в суммах осадков до использования осадкомера Третьякова и после достигают 30% [13]. Кроме того, многочисленные исследования поля осадков, например [6], показали, что его естественная изменчивость на Восточно-Европейской равнине, соответствующая $0,5\sigma$, как раз равна 15%. Таким образом, компромиссным значением стала величина 15%.

4. Оценена также величина климатического слоя стока. Она рассчитывалась как разность между осадками и испарением р. Волга и среднего многолетнего расхода, который сравнивался с климатическими значениями в замыкающем створе (ГМС Лебяжья). Критическим выбрано отклонение от среднего значения, составляющего 7320 м³/с, равное 1620 м³/с. Оно соответствует величине межгодовой изменчивости годового расхода, характеризующейся среднеквадратическим отклонением (СКО) многолетнего ряда гидрометеонаблюдений (с 1900 по 1950 г.). Таким образом, как для объёма волжского стока, так и для величины среднемноголетнего расхода в замыкающем створе критическим значением ошибки принята величина в 20% от среднемноголетних. Сток р. Волга рассчитывался

по уравнению водного баланса $Y = P - E$ в каждой ячейке сетки $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, где P и E – соответственно годовые суммы осадков и испарения по результатам моделирования. При получении объёма волжского стока со всего водосбора учитывалось изменение площади элементарных ячеек в зависимости от географической широты:

$$P = (a_1 F_1 P_1 + \dots + a_n F_n P_n) / F; \quad (1)$$

$$E = (a_1 F_1 E_1 + \dots + a_n F_n E_n) / F;$$

$$F = a_1 F_1 + \dots + a_n F_n, \quad (2)$$

где F – площадь всего волжского водосбора; F_1, F_n – площади элементарных ячеек МОЦА; a_n, a_1 – весовые коэффициенты, равные 1, если ячейка полностью попадала в пределы волжского бассейна, 0,5 – если в пределы водосбора попадала половина ячейки, и т.д.); P_1, P_n и E_1, E_n – соответственно осадки и испарение в каждой ячейке; P, E – соответственно средние по бассейну значения осадков и испарения.

5. Удачным критерием для региональных оценок модельного климата служит гидротермический коэффициент Селянинова K_C , который рассчитывался для каждого из выделенных регионов по формуле

$$K_C = 10 \sum_{T>10} R / \sum_{T>10} T, \quad (3)$$

где $\sum_{T>10} R$ – сумма осадков за период со среднесуточными температурами выше $+10^\circ\text{C}$, мм; $\sum_{T>10} T$ – сумма температур за тот же период, $^\circ\text{C}$.

Для коэффициента Селянинова приняты предельно допустимые ошибки, по модулю равные 0,3. Большая погрешность означает, что температурно-влажностный режим, воспроизведённый МОЦА для какого-либо района, соответствует соседней природной зоне.

Оценка воспроизведения моделями современного климата Восточно-Европейской равнины. Рассчитывались следующие характеристики: 1) средние многолетние величины температуры и осадков, осреднённые за 50 лет для стационарных и модельных данных в каждой точке; 2) амплитуда их годового хода; 3) пространственное среднее квадратическое отклонение. Результаты оценок, осреднённых по тестовой области, приведены в табл. 3, из которой хорошо видно, что даже для средних многолетних величин, осреднённых к тому же по территории, площадью 2,8 млн км², ошибки довольно велики. Температурный режим лучше всего воспроизвела модель ECBILTCLIO, средние годовые суммы осадков – модель HADCM, а средние многолетние объёмы стока Волги – модель CNRM. Но если

Таблица 3. Оценка качества воспроизведения моделями среднегодовых климатических характеристик, осреднённых по тестовой территории (большая часть Восточно-Европейской равнины)*

Модель	Температура, $^\circ\text{C}$			Осадки		Сток
	ΔT	ΔA	$\Delta \sigma T$	$\Delta P, \%$	$\Delta \sigma P$, мм	ΔQ , км ³
ECBILTCLIO	0,1	0,1	3,1	-29	-0,6	0,16
CNRM	-0,7	0,1	2,3	-12	0,7	0,2
FGOALS	-3,0	15,8	2,1	-20	8,8	0,5
HADCM	-1,3	6,9	2,1	10	-0,7	0,5

* ΔT – среднегодовая модельная ошибка; ΔA – разность между модельной и фактической годовой амплитудой приземной температуры воздуха, осреднённой по области верификации; $\Delta \sigma T$ – среднегодовая разность между модельным и фактическим пространственным среднее квадратическим отклонением температуры; ΔP – среднегодовая относительная модельная ошибка осадков; $\Delta \sigma P$ – среднегодовая относительная модельная ошибка воспроизведения пространственного СКО осадков; ΔQ – средняя относительная ошибка в воспроизведении объёма стока Волги.

брать совокупность климатических характеристик, то лишь одна модель – CNRM попала в рамки выбранных нами критериев.

Результаты региональных оценок приведены в табл. 4. Для всех четырёх моделей характерна общая закономерность: занижение среднегодовой температуры в северных таёжных областях (регион 1) и её завышение в среднем и нижнем течении Волги (регион 3). По отдельно взятым регионам среднегодовые температуры и суммы осадков лучше всего воспроизведены моделью HADCM. Однако годовая амплитуда температуры и, самое главное, сток Волги воспроизведён моделью нереалистично. Это связано с большими ошибками при вычислении испарения. Самые плохие результаты по всем климатическим параметрам дала модель FGOALS. Как видно из оценок, использование ансамблевого метода для анализа климата Восточно-Европейской равнины нецелесообразно ввиду малого числа моделей и больших разбросов оценённых величин. Поэтому рассмотрим данные каждой модели отдельно.

Климат Восточно-Европейской равнины в позднеплейстоценовом криохроне

Региональный отклик климата Восточно-Европейской равнины на происходящие глобальные изменения в эпоху позднеплейстоценового криохрона оказался весьма значительным. Дело в том, что, как уже отмечалось, практически вся северная часть Европы была занята покровным оледенением. Несмотря на разногласия, возникающие между палеогеографами относительно объёмов оледене-

Таблица 4. Региональные оценки качества воспроизведения моделями среднегодовых климатических и гидрологических характеристик*

Модель	Номер региона	Температура, °С		Осадки ΔP , %	Коэффициент Селянинова ΔK_C	Сток Волги ΔQ , км ³
		ΔT	ΔA			
CNRM	1	-3,8	0,6	-2	-0,1	0,16
	2	0,7	2,2	-10	-0,2	
	3	2,2	-2,7	-22	-0,3	
ECBILTCLIO	1	-4	1,7	-11	-0,3	0,20
	2	1,4	1	-38	-0,6	
	3	2,6	-2,7	-23	-0,3	
HADCM	1	-3,7	8,4	4	-0,2	0,50
	2	0,4	7,7	11	-0,2	
	3	0,4	4,1	13	-0,1	
FGOALS	1	-5,5	14	-79	-1,1	0,50
	2	-1,8	14,3	-30	-0,4	
	3	-0,5	19	35	0,1	

* ΔK_C – разница между показателем коэффициента Селянинова, рассчитанного по стационарным и модельным данным; остальные обозначения – см. табл. 3; номер региона: 1 – тайга; 2 – смешанный лес; 3 – лесостепь

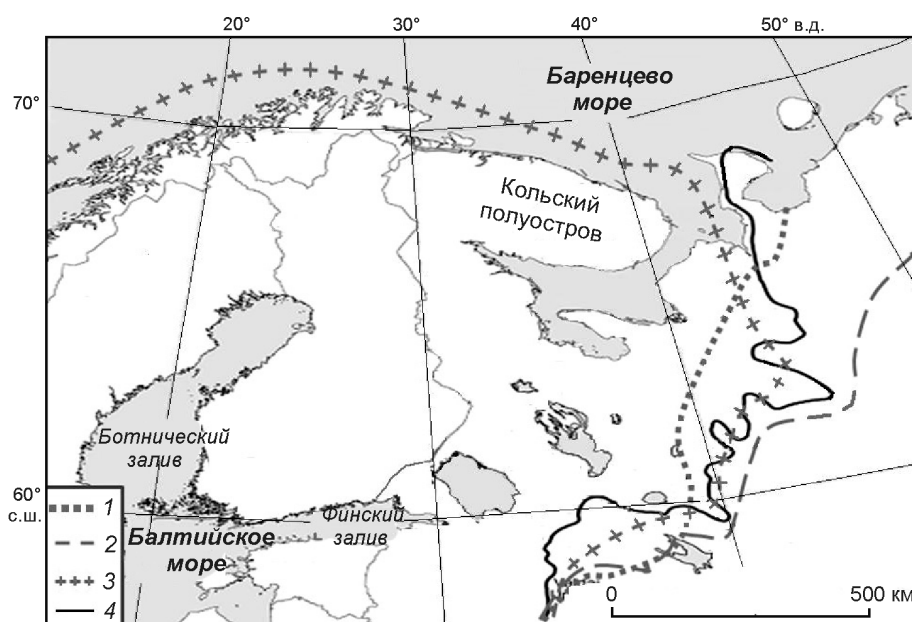


Рис. 2. Распространение оледенения на севере Восточно-Европейской равнины в эпоху позднеледникового криохрона по данным реконструкций:

1 – А.А. Величко [3]; 2 – Д.Д. Квацова [8]; 3 – К.К. Маркова [12]; 4 – проекта QUEEN [22]

Fig. 2. Scandinavian ice sheet in the northern part of East-European Plain at the LGM (by different paleoreconstructions):

1 – [2]; 2 – [8]; 3 – [12]; 4 – [22]

ния [4], большинство исследователей считают, что Скандинавский ледник занимал север Европы [3, 8, 12, 22]. Некоторые из этих реконструкций представлены на рис. 2. В качестве исходных данных в моделях использованы реконструкции Скандинавского щита ICE-5G v1.1 [21] (рис. 3, а). На рис. 3, б представлены конфигурации щита по данным моделей. Как видно, в целом конфигурация сходна, небольшие различия объясняются как пространственным разрешением моделей и периодом интегрирования, так и чувствительностью модели к внешнему воздействию. Верховья бассейна Волги (в её современной конфигурации) находились в зоне оледенения по данным всех четырёх моделей.

Наличие щита должно было отразиться на температуре и увлажнении территории как в результате непосредственно охлаждающего эффекта, так и за счёт изменения характера циркуляции.

Температура. По данным реконструкций, средняя многолетняя приземная температура над сушей была ниже современной примерно на 5 °С, а над океанами было холоднее только на 3 °С [2]. Очаги отрицательной годовой аномалии температуры были естественным образом привязаны к ледниковым щитам Северной Европы и Америки, где они достигали $-25 \div -30$ °С. Меньше всего годовая температура изменилась во внутритропических широтах, где она была ниже современной на

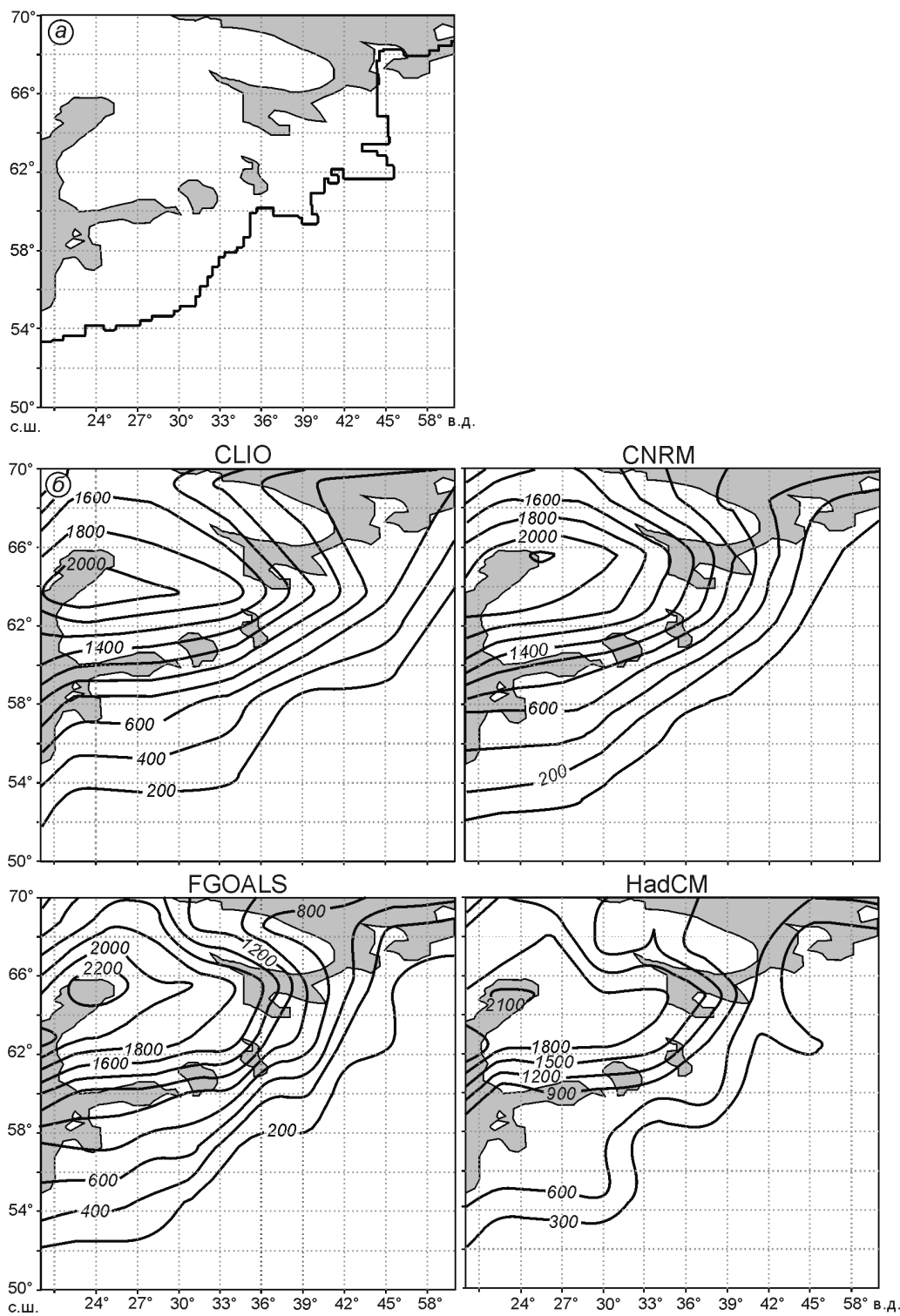


Рис. 3. Граница Скандинавского ледника по данным: *a* – ICE-5G [21]; *б* – моделирования
Fig. 3. The configuration of the Scandinavian ice sheet: *a* – ICE-5G [21]; *б* – PMIP-data

1–2 °С, в основном за счёт отрицательной аномалии температуры поверхности океана. Палинологические данные позволяют судить и о сезонном ходе аномалии. В Европе и Северной Америке отрицательная аномалия в зимние месяцы достигала –30 °С, летом же не превышала 15 °С.

По данным моделирования, в целом по миру наблюдается схожая картина (рис. 4, *a*). Если рассматривать Восточно-Европейскую равнину, то годовые аномалии (см. рис. 4, *б*) здесь достигают 24–28 °С на северо-западе, постепенно уменьшаясь к юго-востоку – там они составляют всего около

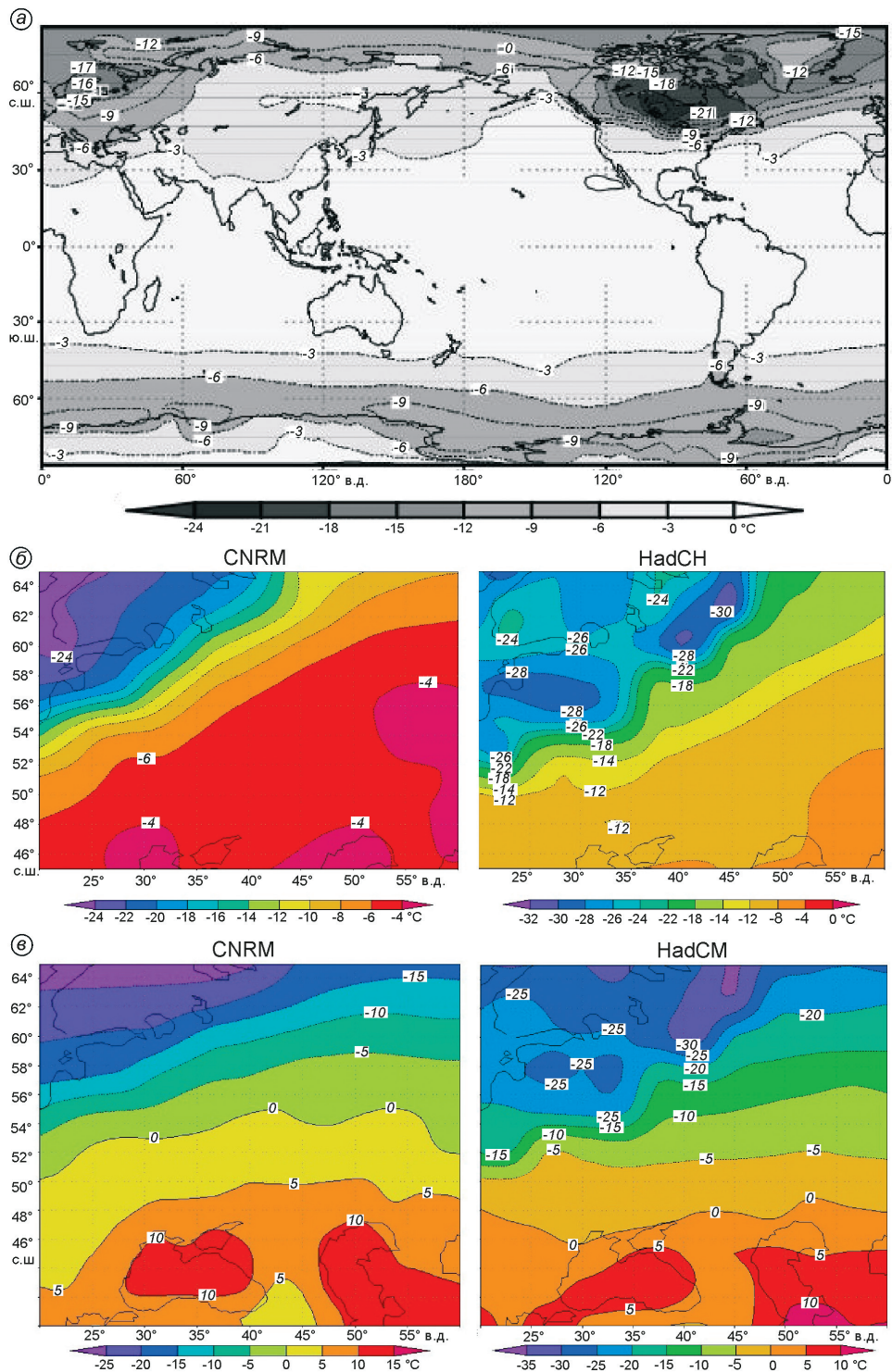


Рис. 4. Температурный режим:

a – отклонения среднегодовой температуры позднелейстоценового криохрона (21 тыс. л.н.) от современной, °C, ансамбль моделей; *b* – отклонения среднегодовой температуры позднелейстоценового криохрона по данным отдельных моделей от современной на территории Восточно-Европейской равнины, °C; *c* – абсолютные значения среднегодовой температуры по данным отдельных моделей на территории Восточно-Европейской равнины, °C

Fig. 4. Temperature:

a – the difference between annual average temperature of the LGM and preindustrial climate (data of ensemble of PMIP-models), °C; *b* – the difference between annual average temperature of the LGM and preindustrial climate on East-European Plain (data of PMIP-models), °C; *c* – annual average temperature of the LGM on East-European Plain (data of PMIP-models), °C

ло 4 °С, зимние аномалии температуры в среднем превышают летние на 4–6 °С. Влияние Скандинавского ледника привело к тому, что изотермы стали располагаться субширотно, в то время как для современного климата характерно направление СЗ–ЮВ, значительно увеличился и субширотный градиент, достигая 2,5–3 °С/100 км. Что касается абсолютных значений, то в целом все модельные поля выглядят достаточно реалистично (в модели CNRM прослеживаются даже повышение температуры над Чёрным и Каспийским морями и её понижение над Кавказом). Во всяком случае, по данным палеореконов [2, 3], граница вечной мерзлоты проходила в районе 48–52° с.ш., и если за неё условно принять нулевую годовую изотерму, то, как видно из рис. 4, в, модели в целом воспроизвели границу, близкую к реконструированной.

Режим увлажнения. Существование Скандинавского ледника должно было повлиять на характер атмосферной циркуляции. Анализ результатов моделирования показывает, что в эпоху позднеледникового криохрона в зимние месяцы над Атлантико-Европейским регионом атмосферное давление на уровне моря существенно увеличилось (на 15–20 мбар), но вместе с тем геопотенциал снизился (на 10–20 дин. м), т.е. над регионом господствовали антициклоны арктического происхождения. Одновременно с этим в области Алеутской депрессии значительно понизилось давление (на 10–15 мбар), а также немного снизился геопотенциал (на 5–10 дин. м).

Подробнее эти вопросы рассмотрены в работе [20]. Большинство МОЦА воспроизвели усиление западного переноса воздушных масс и циклонической деятельности. При этом над Атлантико-Европейским регионом зона циклогенеза не сместилась в южные широты, как предполагалось в работе [2], а «сузилась», занимая меньшую площадь по сравнению с современной. Отчасти этим и объясняется уменьшение годовых сумм осадков в умеренных широтах Европы, Северной Америки и Азии. Безусловно, значительное охлаждение тропосферы, которое повлекло за собой существенное уменьшение влагосодержания воздушной толщи, также заметно повлияло на количество выпадающих осадков. Нечто подобное наблюдается в условиях современного климата зимой: так, над Европой в холодном полугодии циклоническая активность существенно выше, чем в тёплом, в то время как сумма осадков (за исключением Скандинавии и средиземноморских стран) за период ноябрь–март примерно в 1,5 раза меньше, чем за май–сентябрь.

Результаты моделирования не дают однозначной пространственной картины изменения годовых сумм осадков на Восточно-Европейской равнине (рис. 5). По результатам всех моделей их количество сократилось в среднем на 40–50%. И в модели CNRM, и в модели CLIO максимум осадков наблюдается в пограничной с ледником области, что можно объяснить интенсивной циклонической деятельностью, вызванной значительным температурным градиентом. В случае же моделей FGOALS и HadCM такие закономерности не просматриваются. Что же касается испарения, то все модели показали его уменьшение на 35–40%, причём если говорить об абсолютных величинах, то наибольшее изменение произошло опять же на северо-западе Восточно-Европейской равнины, над поверхностью ледника.

Сток Волги

В связи с совершенно иной гляциологической и климатической обстановками, режим рек Восточно-Европейской равнины также претерпел значительные изменения. Основываясь на данных моделирования, можно достаточно уверенно говорить об изменении гидрологического режима только достаточно крупных объектов. Для Восточно-Европейской равнины такой объект – р. Волга. Поскольку, как было показано ранее, наибольшее согласование с данными палеореконов наблюдается у моделей CNRM и CLIO, мы решили использовать именно их для расчёта объёма стока Волги. Если рассчитать слой стока по формулам (1) и (2), т.е. рассмотреть как разницу между осадками и испарением, то окажется, что объём волжского стока уменьшился на 25–35% (дефицит осадков не был компенсирован уменьшением испарения), однако если посмотреть на рис. 6, то видно, что часть Волжского бассейна была занята Скандинавским ледником, поэтому можно предположить, что абляция могла внести свой вклад в водный бюджет Волги.

Итак, к величине климатического стока р. Волга на территории, не занятой покровным оледенением, необходимо прибавить слой стока с поверхности ледника. Его можно выразить следующим образом:

$$h_c = 10W/L_c, \quad (4)$$

где h_c – слой талой воды, мм; W – количество тепла, расходуемого на таяние снега за рассматриваемый интервал времени, Дж/см²; L_c – скрытая теплота плавления снега и льда, равная 330 Дж/г;

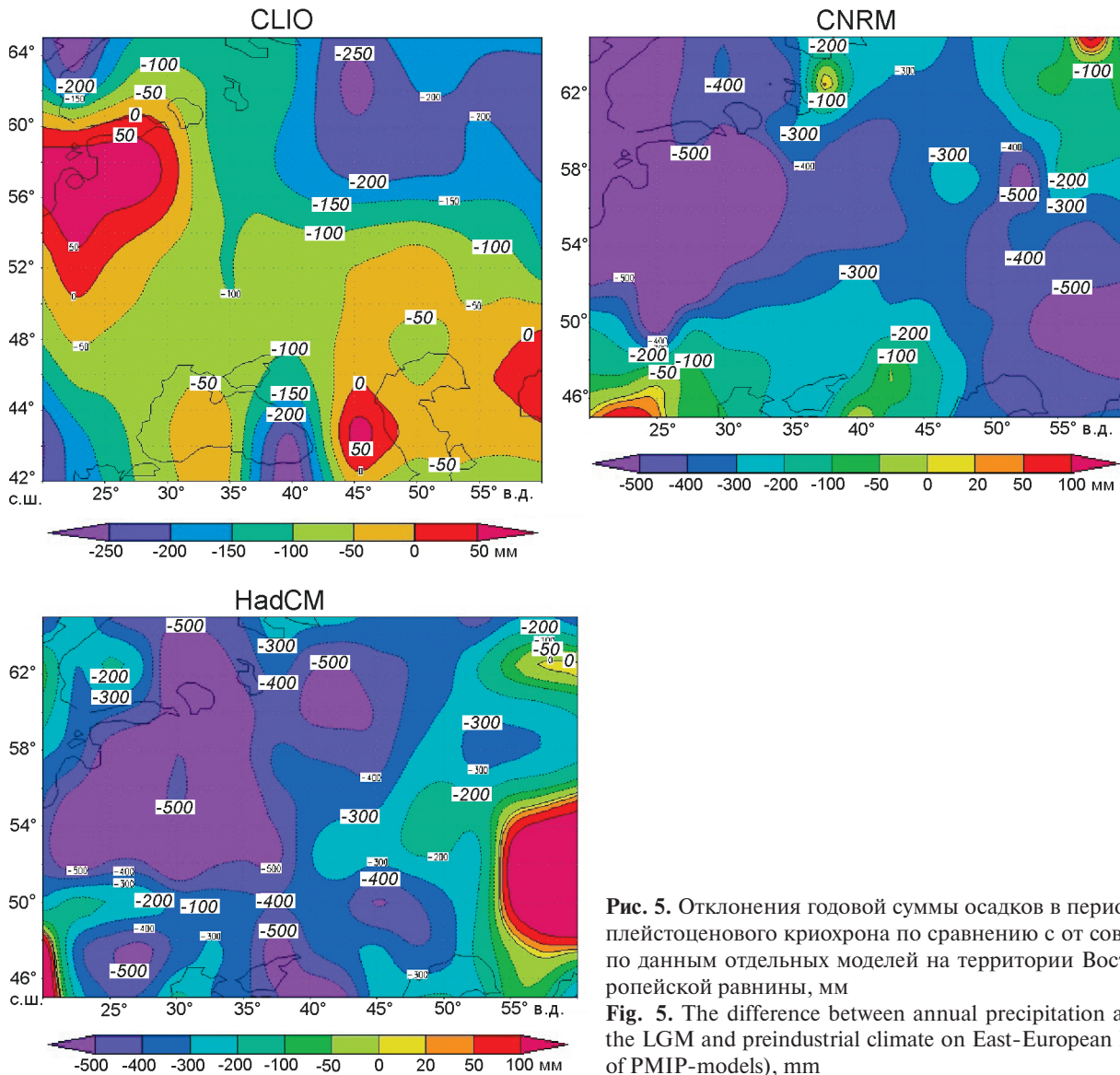


Рис. 5. Отклонения годовой суммы осадков в период позднелейстоценового криохрона по сравнению с от современной по данным отдельных моделей на территории Восточно-Европейской равнины, мм
Fig. 5. The difference between annual precipitation amounts of the LGM and preindustrial climate on East-European Plain (data of PMIP-models), mm

множитель 10 необходим, чтобы выразить слой стаивания в миллиметрах.

Поток тепла в снег или лёд в единицу времени через единицу площади поверхности определяется радиационным балансом поверхности снега (льда) B , турбулентным теплообменом поверхности с атмосферой H , потоком скрытого тепла LE , потоком тепла из грунтов и пород, на которых лежит ледник, F_S и теплом, поступившим вместе с жидкими осадками, F_{pr} :

$$dW/dt = B + H + LE + F_S + F_{pr}. \quad (5)$$

Изучение горных и покровных ледников показывает, что последние три параметра – LE , F_S и F_{pr} – дают не более 10% общего теплового баланса [11], поэтому ими можно пренебречь. Радиаци-

онный баланс B рассчитывался на основе результатов моделирования по формуле

$$B = Q - R - (E_s - E_a), \quad (6)$$

где Q – суммарное поступление коротковолновой радиации к поверхности ледника; R – отражённая коротковолновая радиация от поверхности; $E_s - E_a$ – эффективное излучение; размерность радиационных потоков – Вт/м².

Теплообмен H находится по эмпирической формуле Кузьмина [11]:

$$H = 162,2(0,18 + u_2)(T_2 - T_0), \text{ Дж/см}^2\text{сут}, \quad (7)$$

где u_2 – скорость ветра на высоте 2 м, м/с; T_2 – температура воздуха на высоте 2 м, °C; T_0 – температура поверхности снега, °C.

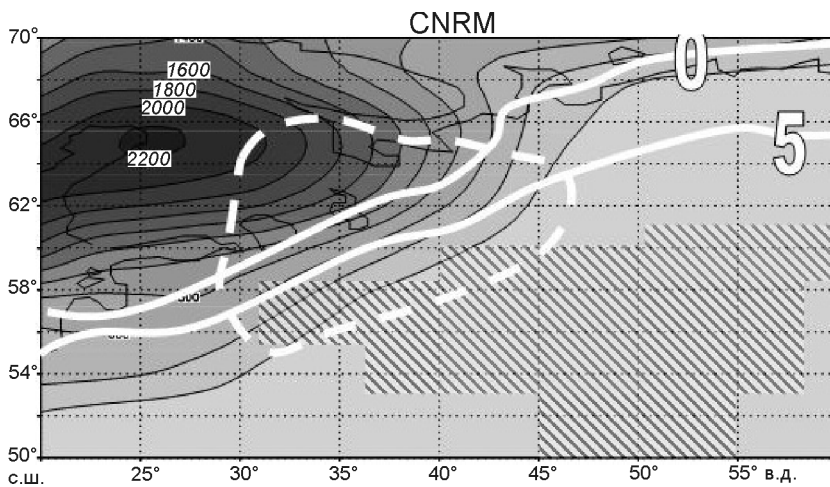


Рис. 6. Схема ледовой обстановки в верховьях Волги по данным моделирования CNRM.

Тёмные изолинии – изогипсы ледовой поверхности, м; штриховкой показана область современного водосбора Волги, белой пунктирной линией – те области ледника, слой стока с которых был учтён при расчёте годового объёма стока уровня Каспийского моря; сплошные белые линии – изотермы июля, °С

Fig. 6. Scandinavian ice sheet, the simulation of CNRM.
Dark lines – isohypses of ice surface, m; shading shows the region of modern watershed of the Volga; the white dotted line – part of the glacier from which melt-water could flow into the Caspian sea; solid white lines – isotherms of July, °C

Таблица 5. Изменение водного режима Волги и Каспия в эпоху максимума позднеплейстоценового криохрона по данным моделирования

Характеристики	Климат	
	современный	позднеплейстоценового криохрона
Сток, км ³ /год:		
климатический	205	78*
за счёт таяния ледника	0	384
суммарный	205	462
Изменение уровня Каспийского моря по сравнению с современным, м	0	+48

*Рассчитан для ячеек, не занятых ледником.

Для расчётов использовались ежедневные поля модели CNRM. Выбор этой модели объясняется, с одной стороны, наличием всех необходимых для расчётов полей, а с другой – результатами оценки (сравнения с данными ГМС для доиндустриального климата и палеореконструкциями для LGM), согласно которым модель показала себя как наиболее достоверно воспроизводящая поля основных параметров. В итоге были получены среднемесячные значения слоя абляции Скандинавского ледника (табл. 5). При составлении алгоритма расчёта слоя абляции предполагалось, что активное таяние снега и льда происходит при переходе среднесуточной (среднемесячной) температуры через 0 °С. Сначала рассчитывалось таяние осадков, выпавших в твёрдом виде (эти данные моделирования изначально даны в виде водного эквивалента), а затем таяние льда.

Уровень Каспийского моря

Известно, что в последние 20 тыс. лет сток р. Волга был определяющим гидрологическим вкладом в водный баланс Каспийского моря [10]. Его величина в разные эпохи менялась в преде-

лах 75–90% интегрального слоя стока. Таким образом, вариации уровня Каспийского моря напрямую связаны с изменением водного режима Волги. Чтобы увязать их между собой, предположим, что уровень Каспийского моря как бессточного водоёма стремится занять равновесное состояние. Это будет продолжаться до тех пор, пока водный баланс не приблизится к нулю из-за изменений площади озера и соответствующих изменений испарения с зеркала водоёма [7]. Условие равенства приходной и расходной частей для бессточного водоёма с площадью f будет следующим: $ef = YF$ (Y – речной сток, мм, с единицы площади водосбора, площадью F , км²).

Поскольку известно соотношение между изменением площади Каспийского моря f и его уровня h , можно записать уравнение, описывающее изменение уровня озера с учётом всех факторов в эпоху позднеплейстоценового криохрона (более подробно см. [18]): $\Delta h = (\Delta h)_{p-e} + (\Delta h)_G + (\Delta h)_F + (\Delta h)_e$.

Первое и второе слагаемые представляют собой изменение уровня вследствие изменения стока Волги, где $(\Delta h)_{p-e}$ – вклад речного климатического стока в вариации уровня, а $(\Delta h)_G$ – вклад

талых вод с поверхности ледника. Третье слагаемое $(\Delta h)_F$ описывает вариации уровня бессточного водоёма, возникающие в результате изменений площади водосбора. В работе [4] предполагается, что в приходной части водного бюджета Каспийского моря могли присутствовать воды сибирских рек, однако сколько-нибудь весомых доказательств этой концепции не существует. Поэтому в данной работе мы считаем, что слагаемое $(\Delta h)_F$ равно нулю. Рассмотрим величину $(\Delta h)_e = \Delta e/e_0$. Это слагаемое характеризует вклад в общую изменчивость уровня испарения с зеркала озера. Заметим, что оценки изменения испарения и осадков по данным моделирования (особенно одной модели, а не ансамбля) не очень надёжны для такой площади. По результатам модели CNRM, испарение с зеркала озера в эпоху позднелейстоценового криохрона уменьшилось всего на 10 км^3 , что могло привести к увеличению уровня моря на 1 м. Эта величина существенна при расчётах современных короткопериодических колебаний уровня, однако при оценке возможных колебаний уровня в эпоху позднелейстоценового криохрона подобным вкладом также можно пренебречь. Данные оценки видимого испарения с зеркала Каспийского моря неплохо согласуются с оценками, приведёнными в работах [9, 19] и выполненными по результатам RMIPI, – там эта величина была порядка 1–2 м.

Таким образом, существенно повлиять на уровень Каспийского моря могло только изменение стока Волги. Согласно расчётам, выполненным по формулам (1)–(7), вклад Волги в водный бюджет Каспийского моря увеличился более чем вдвое (см. табл. 5), что привело к росту уровня озера на 45–50 м относительно его современного положения. В ряде исследований [1, 3, 8, 16, 23] показано, что уровень Каспийского моря в эпоху позднелейстоценового похолодания, действительно, существенно превышал современный. Результаты многочисленных палеогидрологических исследований показывают практически полную синхронность ледниковых эпох Северного полушария, трансгрессий Каспийского моря и общепланетарных регрессий Мирового океана [10].

Заключение

В этой работе проанализированы результаты численного моделирования по воспроизведению современного климата и климата последнего ледникового максимума в рамках проекта RMIPI II. Рассмотрено также влияние Скандинавского ледника на климат Восточно-Европейской равнины, а

именно: на температурный режим, режим увлажнения, сток Волги и уровень Каспийского моря. Стоит признать удачным и соответствующим современным палеорекострукциям воспроизведение моделями поля температуры (межмодельный разброс имеет ту же величину, что и точность реконструкций). Наличие покровного оледенения привело к появлению аномалий порядка $20\text{--}25 \text{ }^\circ\text{C}$ на севере и $4\text{--}6 \text{ }^\circ\text{C}$ на юге. Подобное понижение температуры стало причиной уменьшения слоя испарения по данным моделирования на $35\text{--}40\%$ и годовых сумм осадков на $45\text{--}50\%$; изменилось и распределение осадков по территории Восточно-Европейской равнины (последнее также представляет собой результат перестройки циркуляционных атмосферных процессов Северного полушария).

Подобное изменение режима увлажнения должно было привести к уменьшению слоя стока Волги на $25\text{--}35\%$, а следовательно, и к падению уровня Каспийского моря, поскольку дефицит осадков не компенсировался низким испарением. Однако если допустить, что часть талых вод, которые образовались в результате абляции части Скандинавского ледника, располагающегося на территории Волжского водосбора, поступала в реку, то это могло бы принципиально изменить ситуацию. Используя данные численного моделирования, удалось оценить объёмы талых вод и их вклад в водный бюджет Волги. Он оказался весьма существенным и привёл к росту уровня Каспийского моря на $45\text{--}50 \text{ м}$ по сравнению с современным положением. Вполне возможно, что вклад абляции Скандинавского ледника в изменение уровня Каспийского моря – не единственная причина повышения уровня озера в эпоху LGM и, может быть, не самая главная. Не стоит исключать и роль вечной мерзлоты.

Согласно палеорекострукциям и данным моделирования, Скандинавский ледник располагался таким образом, что его талые воды могли поступать в Волгу, а расчёты показали, что их объём существен. Эти факты в какой-то мере можно рассматривать как физическое обоснование гипотезы трансгрессий Каспийского моря за счёт талых ледниковых вод в период максимума оледенения позднего плейстоцена. Полученный результат стоит рассматривать именно с этих позиций.

Литература

1. Варущенко С.И., Варущенко А.Н., Клиге Р.К. Изменение режима Каспийского моря и бессточных водоемов в палеовремени. М.: Наука, 1987. 255 с.
2. Величко А.А. Соотношение изменений климата в высоких и низких широтах Земли в позднем плейстоцене и голо-

- цене // Палеоклиматы и оледенения в плейстоцене. М.: Наука, 1989. С. 5–19.
3. *Величко А.А.* Палеоклиматы и палеоландшафты внетропического пространства Северного полушария: Атлас-монография. М.: ГЕОС, 2009. 119 с.
 4. *Гросвальд М.Г.* Евразийские гидросферные катастрофы и оледенение Арктики. М.: Научный мир, 1999. 118 с.
 5. *Евстигнеев В.М.* Практические работы по курсу «Речной сток и гидрологические расчеты». М.: Изд-во МГУ, 1991. 69 с.
 6. *Исаев А.А.* Атмосферные осадки: Ч. I. Изменчивость характеристик осадков на территории России и сопредельных стран. М.: Изд-во МГУ, 2002. 192 с.
 7. *Калинин Г.П., Клиге Р.К., Шлейников В.А.* Основные проблемы палеогидрологии // Проблемы палеогидрологии: Сб. науч. работ. М.: Наука, 1976. С. 7–20.
 8. *Квасов Д.Д.* Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. Л.: Наука, 1975. 278 с.
 9. *Кислов А.В., Торопов П.А.* Моделирование климатических условий Восточно-Европейской равнины и вариаций стока р. Волга в эпоху позднеплейстоценового похолодания // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2006. № 2. С. 13–17.
 10. *Клиге Р.К., Данилов И.Д., Коницев В.Н.* История гидросферы. М.: Научный мир, 1998. 370 с.
 11. *Кузьмин П.П.* Процесс таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 346 с.
 12. *Марков К.К., Лазуков Г.И., Николаев В.А.* Четвертичный период: (Ледниковый период – Антропогенный период). Т. 1. М.: Изд-во МГУ, 1965. 371 с.
 13. Методические указания к четвертой части Справочника по климату СССР: раздел 2 «Атмосферные осадки». Введение поправок на недоучет осадков осадкомером. JL: Ротапринт, 1966. 40 с.
 14. Официальный сайт PCMDI. URL: <http://www-pcmdi.llnl.gov/> (дата обращения 01.06.2013)
 15. Официальный сайт PMIP2. URL: <http://pmip2.lsce.ipsl.fr/> (дата обращения 01.06.2013)
 16. *Свиточ А.А.* Уровненный режим Каспийского моря по палеогеографическим данным // Водные ресурсы. 1997. Т. 24. С. 13–22.
 17. *Торопов П.А.* Верификация результатов численного моделирования климата Восточно-Европейской равнины // Метеорология и климатология. 2005. № 5. С. 5–21.
 18. *Торопов П.А., Морозова П.А.* Оценка уровня Каспийского моря в эпоху позднеплейстоценового криохрона на основе результатов численного моделирования климата с учетом таянья Скандинавского ледника // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2011. № 2. С. 55–61.
 19. *Kislov A.V., Toropov P.A.* Simulation of Black Sea and Caspian Sea responses to Quaternary climate scenarios // Geography. Environment. Sustainability. 2008. № 1. P. 68–79.
 20. *Laîné A., Kageyama M., Salas-Mélia D., Voltaire A., Rivière G., Ramstein G., Planton S., Tyteca S., Peterschmitt J.Y.* Northern hemisphere storm tracks during the last glacial maximum in the PMIP2 ocean-atmosphere coupled models: energetic study, seasonal cycle, precipitation // Climate Dynamics. 2009. № 32. Issue 5. P. 593–614.
 21. *Peltier W.R.* Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: the ICE-5G (VM2) model and GRACE // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2004. V. 32. P. 111–149.
 22. *Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I., Demidov I., Dowdeswell J.A., Funder S., Gataullin V., Henriksen M., Hjort C., Houmark-Nielsen M., Hubberten H.W., Ingolfsson O., Jakobsson M., Kjer K.H., Larsen E., Lokrantz H., Lunkka J.P., Lysa A., Mangerud J., Matiouchkov A., Murray A., Moller P., Niessen F., Nikolskaya O., Polyak L., Saarnisto M., Siegert C., Siegert M.J., Spielhagen R.F., Stein R.* Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia // Quaternary Science Reviews. 2004. № 23. P. 1229–1271.
 23. *Tarasov P.E., Harrison S.P.* Lake status records from the former Soviet Union and Mongolia: a continental-scale synthesis // Palaeohydrology as Reflected in Lake Level Changes as Climatic Evidence for Holocene Times. Gustav Fischer–Verlag, Stuttgart, 1998. P. 115–130.

Summary

In this paper results of climate simulation in East-European Plain (EEP) by coupled climate models (which take part in project PMIP II (Paleoclimate Modeling Intercomparison Project)) are tested for different climatic periods (pre-industrial, Last Glacial Maximum (LGM)). The main parameters for comparison were: temperature, precipitations, evaporation and the Volga runoff. As a result, the model CNRM (Centre National de Recherches Meteorologie, France) was chosen as the best for this territory for pre-industrial climate. Its results were used to calculate runoff of the Volga river during the LGM and modern climate. «Climatic» component of the Volga runoff was calculated as the difference between precipitation and evaporation in the watershed. The «climatic» part of the Volga runoff 21 kyr decreased by 30% compared with the modern (according to model CNRM). The main reason for the low values of «climatic» runoff was a reduction of precipitation on the territory of Volga watershed. The decrease of evaporation could not compensate for the deficit of precipitation. However, according to paleoreconstructions and the results of PMIP II simulation, a significant change to the hydrological regime of the Volga River (21 kyr BP) could be due to the contribution of melt water (about 384 km³/year). This means that to «climatic» component of runoff (about 78 km³/year), one has to add volume of the melt water of the Scandinavian ice sheet, which within the territory of Volga watershed. The results were used to assess the level of the Caspian Sea during this period (changes in the Caspian sea level compared with modern was about 48 meters).