

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК [551.513:551.583.7].001.572

А.В. Кислов, П.А. Торопов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЕЙ
ЧЕРНОГО И КАСПИЙСКОГО МОРЕЙ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЯХ КЛИМАТОВ ПРОШЛОГО¹

Введение

Изменения уровней морей могут быть обусловлены различными причинами. Однако если сосредоточить внимание на изменениях продолжительностью в сотни—тысячи лет, то можно достаточно уверенно говорить о том, что в этом временном масштабе преобладающими должны быть колебания, происходящие при изменении водного баланса водоема, а вклад тектонических изменений играет существенно меньшую роль. Рассмотрим вариации уровней Черного и Каспийского морей, происходившие в голоцене и позднем плейстоцене, с позиций отклика на планетарные изменения климата. В статье рассматриваются три временных среза: современный климат, атлантическое потепление (оптимум) голоцена (6 тыс. л.н. или ~5,3 тыс. радиоуглеродных л.н.) и максимум позднелейстоценового криохрона (21 тыс. л.н. или ~18 тыс. радиоуглеродных л.н.). Выбор данных событий прошлого мотивируется, помимо контрастности, их исключительной обеспеченностью (по сравнению с другими событиями) материалами палеорекопструкций.

При рассмотрении осредненных за много лет условий в случае стационарного состояния ежегодный приток воды в озеро за счет речного стока должен компенсироваться оттоком воды из водоема и потерями за счет видимого испарения. В случае закрытого водоема данное условие запишется в виде следующего уравнения:

$$YF = ef, \quad (1)$$

где Y — слой стока с единицы площади бассейна; F — его площадь; $e = E - P$ — видимое испарение, т.е. разность испарения и осадков с единицы площади озера площадью f . Продифференцируем уравнение (1) и, переходя к конечным разностям, которые, как предполагается, представляют собой отклонение от современного состояния, получим

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\Delta Y}{Y_0} + \frac{\Delta F}{F_0} - \frac{\Delta e}{e_0}. \quad (2)$$

Каждое слагаемое характеризует вклад, который вносят изменения стока, площади бассейна и видимого испарения в изменение площади водоема. Эти изменения в силу эмпирической зависимости, определяемой морфологией дна и берегов, однозначно связаны с изменениями уровня.

Оценка названных факторов может быть выполнена разными способами и с разной степенью надежности. Так, информация об изменениях площади бассейна берется из эмпирических данных или может основываться на результатах восстановления особенностей земной поверхности на основе геодинамического моделирования. Расчет вариаций речного стока осуществляется на основе данных моделей общей циркуляции атмосферы (МОЦА), естественно считать, что разность между модельными количеством осадков и испарением, осредненным по площади бассейна, представляет собой слой стока. При практической реализации этой идеи возникают проблемы с погрешностями модельных величин. Дело в том, что основные черты глобального климата современные МОЦА воспроизводят успешно, чего нельзя сказать о характеристиках регионального климата. Масштаб, начиная с которого ошибки модельных величин становятся устойчивыми и относительно небольшими, оценен, в частности, в работах [7, 14]. Для равнинных территорий он соответствует площадям, покрываемым примерно 15 элементарными ячейками моделей с обычно применяемым горизонтальным разрешением (табл. 1). Поэтому можно надеяться на успешное воспроизведение водного баланса или крупных рек, или многих рек одновременно, объединяя их сток. В нашей работе расчет вариаций речного стока при различном состоянии климата осуществляется на основе данных МОЦА (табл. 1), реализованных в рамках PMIP (Paleoclimate Modelling Intercomparison Project) [20].

В дальнейшем в работе использовались результаты всех МОЦА (табл. 1), за исключением CLIMBER, MSU и LMD4, пространственное разрешение которых слишком грубо для решаемой задачи.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 03-05-64544а и 04-05-65333).

Таблица 1

**Модели общей циркуляции атмосферы,
участвовавшие в PMIP**

Название модели	Организация и страна	Разрешение модели*
BMRC	Bureau of Meteorology Research Center, Австралия	R21L19
CCC2	Canadian Center for Climate Modeling and Analysis, Канада	R32L10
CCM3	National Center for Atmospheric Research Climate community, Канада	T42L18
CCSR1	Center for Climate System Research, Япония	T21L20
CLIMBER	University of Potsdam, Германия	7x18L1
CNRM2	Centre National de Recherches Meteorologie, Франция	T31L19
CSIRO	Common wealth Scientific and Industrial Research Organisation, Австралия	R21L9
ECHAM3	Max-Planck Institute für Meteorologie, Германия	T42L19
GEN2	National Center for Atmospheric Research, США	T31L18
GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, США	R30L20
GISS	Goddard Institute for Space Studies, США	72x46L9
LMD4	Laboratoire de Meteorologie Dynamique, Франция	48x36L11
LMD5	Laboratoire de Meteorologie Dynamique, Франция	64x50L11
MRI2	Meteorological Research Institute, Япония	72x46L15
MSU	МГУ им. Ломоносова, Россия	24x18L3
UGAMP	Universities Global Atmospheric Modeling Programme, Англия	T42L19
UIUC11	University of Illinois Urbana-Champaign, США	72x46L11
UKMO	UK Meteorological Office, Англия	96x73L19
YONU	Yonsei University, Корея	72x46L8

* Под горизонтальным разрешением понимаются спектральные моды (R — ромбоидальное усечение сферических функций, T — треугольное) или число узлов широтно-долготной сетки, покрывающих Землю; L — число вертикальных уровней в атмосфере.

**Оценка качества воспроизведения моделями PMIP
современного годового стока Восточно-Европейской
равнины**

При изучении Черного и Каспийского морей необходимо сосредоточить внимание на моделировании колебаний речного стока Восточно-Европейской равнины (ВЕР). При этом принципиально важным является вопрос оценки качества результатов. Традицион-

но оно определяется сопоставлением с данными наблюдений, относящимися к современному климату. Этот вопрос осложняется проблемой качества имеющихся “климатических эталонов”. В результате специальных исследований [14] пришлось отказаться от сравнения модельных и архивных значений P , E , Y , а сопоставлять рассчитанные каждой моделью PMIP значения слоя стока с расходами воды, измеряемыми в замыкающих створах изучаемых рек.

Результаты моделирования современных объемов стока с ВЕР вместе со средними многолетними величинами, соответствующими современному климату, приведены в [8]. Было принято, что если относительная ошибка воспроизведения объемов стока (для каждого водосбора) лежит в пределах $\pm 20\%$, то результат считался удовлетворительным, поскольку он хоть и может существенно отличаться от средне-многолетнего, но все же попадает в границы экстремальных колебаний стока. Отобранные в соответствии с этой классификацией МОЦА рассматривались как лучшие, и в дальнейшем, при моделировании других климатических режимов, к их данным было более внимательное отношение. Относительно успешно воспроизведены объемы годового стока в Черное море моделями CCM3, CCSR1, CNRM2, UGAMP, UKMO; а в Каспийское море — моделями CCC2, CCM3, CCSR1, UGAMP, YONU. В [14] показано, что точность определения величины годового стока, полученная путем осреднения результатов всех МОЦА, оказывается ощутимо ниже, чем таковая, полученная по результатам лучших МОЦА.

Одним из показателей качества моделирования является не только расчет полного стока всех рек, но и определение доли отдельных рек в общем объеме. Из рассмотренных выше масштабных соображений получается, что такая оценка может быть выполнена с достаточной точностью только для р. Волги. По данным измерений ее вклад в полную величину каспийского стока составляет примерно 84%. На основе лучших моделей PMIP получилась близкая величина — 88%.

**Моделирование климата, речного стока и уровней
Черного и Каспийского морей в период
атлантического потепления в голоцене**

При моделировании состояния палеоклиматов в рамках МОЦА принципиальную роль играет знание параметров и граничных условий. В середине голоцена содержание углекислого газа в атмосфере составило около 280 ppm [25], и этот “доиндустриальный уровень” сохранялся с небольшими флуктуациями вплоть до конца XIX века. Плейстоценовый скандинавский ледник исчез около 9 тыс. л.н., небольшие фрагменты лаврентийского ледникового щита просуществовали еще 1—2 тыс. лет [16, 27], так что к середине голоцена планетарный ледниковый покров принял современные очертания. Температура поверхности океана была близка к современной (аномалии не превышали $0,5^\circ\text{C}$, т.е. были в пределах точности реконструкций). Изменения инсоляции на внешней границе атмосферы, обусловленные вариациями орби-

тальных параметров Земли (эффект Миланковича), 6 тыс. л.н. составляли +5% летом и -5% зимой (осредненные по Северному полушарию) [15]. Таким образом, отличия климата середины голоцена от современного складывались главным образом под влиянием отличного от современного прихода солнечной энергии. Этот фактор и был учтен в экспериментах PMIP.

Моделирование показало, что на территории Восточной Европы 6 тыс. л.н. летняя температура была несколько выше современной, а зима была холоднее. Однако зимняя аномалия статистически незначима, т.е. ощутимым отличием климата от современного является более теплое лето. Осадков на ВЕР выпадало примерно на 5% меньше, чем в настоящее время. Межмодельный разброс весьма велик, и с этих позиций такие аномалии, рассматриваемые в каждой элементарной ячейке, статистически незначимые. Однако слой стока, вычисляемый суммарно по значительной территории, отличается существенно меньшим межмодельным разбросом, что вселяет надежду в адекватность его воспроизведения. Эмпирические данные о состоянии увлажнения ВЕР во время атлантического потепления несколько отличаются [1, 3, 13, 17], однако, суммируя результаты, можно сделать заключение о небольшом снижении стока р. Волги.

В табл. 2 приведены результаты модельных расчетов годового стока с ВЕР в бассейны Черного и Каспийского морей. Аномалии, осредненные по всему ансамблю моделей и отдельно только по лучшим моделям (см. выше), часто различаются даже по знаку. В целом можно отметить, что модельный годовое сток с ВЕР в эпоху атлантического потепления мало отличался от современного (при этом вклад Волги в величину каспийского стока несколько вырос — составил 93%).

Эти данные позволяют сделать вывод, что серьезных изменений уровня рассматриваемых морей за счет вариаций речного стока быть не могло. Рассмотрим другие факторы, учтенные в уравнении (2). В некоторых работах, например в [9], развиваются представления о том, что во время теплого периода середины голоцена активное таяние памирских ледников могло увеличивать водность Амударьи, воды которой через Сарыкамышскую котловину и русло ныне пересохшей р. Узбой могли попадать в Каспий. Однако количественные оценки объемов стока различаются на несколько порядков [9] поэтому учесть эту информацию невозможно. Что касается испарения, то вклад его изменения по результатам компьютерных экспериментов в рамках климатической региональной модели оценен как сравнительно небольшой [21]. Таким образом, на основе подсчета вариаций водного баланса можно сделать вывод, что в рассматриваемую климатическую эпоху уровень морей не мог сильно отличаться от современного. Это тем более правдоподобно для гидрологически незамкнутого Черного моря, поведение которого контролировалось состоянием Мирового океана. Что касается Каспийского моря, то неполнота наших представлений о состоянии его водного баланса именно и проявилась в виде некоторой нестабильности его уровня, размах колебаний которого достигал нескольких метров [1, 9, 11, 12].

Таблица 2

**Воспроизведение моделями годового стока
с Восточно-Европейской равнины 6000 л.н.**

МОЦА	Бассейны			
	Черное море		Каспийское море	
	Y , км ³	$\Delta Y/Y_0$, %	Y , км ³	$\Delta Y/Y_0$, %
BMRC	337	>1000	385,2	466
CCC2	181,7	-1	260,9	8
CCM3	375,2	5	356,1	15
CCSR1	304,2	-11	166	-15
CNRM2	185,8	-29	153,9	-20
CSIRO	30,5	-88	60,8	-71
ECHAM3	101,3	-37	138,3	-20
GEN2	250,2	11	88,4	-6
GFDL	236,2	-1	46,6	5
GISS	14,5	-65	115,5	22
LMD5	1088,4	67	414,8	121
MR12	239,2	3	112,7	-15
UGAMP	327,5	-2	221,8	-3
UKMO	335,7	11	146,5	6
UIUC	521,2	1	156,4	10
YONU	575,7	2	209,1	-1
АНС*	319	9	189,6	14
ЛУЧШ**	305,7	-5	262	5

* АНС — среднее по ансамблю всех МОЦА; ** ЛУЧШ — среднее по ансамблю тех МОЦА, которые наиболее точно воспроизвели современные объемы годового стока.

**Моделирование климата, речного стока и уровней
Черного и Каспийского морей в период
позднеплейстоценового криохрона**

Солянный климат 21 тыс. л.н. мало отличался от современного (отклонения составляли примерно $\pm 3\%$ в Северном полушарии летом и зимой [15]). Содержание CO_2 в атмосфере принято равным 200 ppm [25]. Распределение ледяных щитов (с соответствующими вариациями альбедо и высоты над ур.м.) задано в соответствии с данными работы [24]. Роль океанов была учтена по разному в двух различных экспериментах: в одном распределение температуры поверхности океана задавалось по известным данным реконструкций CLIMAP, во втором оно рассчитывалось в совместной модели МОЦА—деятельный слой океана. Сравнение показало, что в первом случае данные получаются реалистичнее (они и были использованы в данной работе). Отметим, что граничные условия, использованные в PMIP, содержат ряд неопределенностей. Существуют резко отличающиеся от принятого сценария представления о положении и размерах материкового оледенения и роли вечной мерзлоты [2, 4]. Появляются новые данные, указывающие, что в тропиках океан был несколько холоднее, чем это принято в сценарии CLIMAP [18], также возникают представления о том, что морской лед Северной Атлантики не существовал круглогодично [26].

Откликом на изменения факторов климатообразования стало формирование над материками Северного полушария значительно более холодного и сухого климата по сравнению с современным, причем моде-

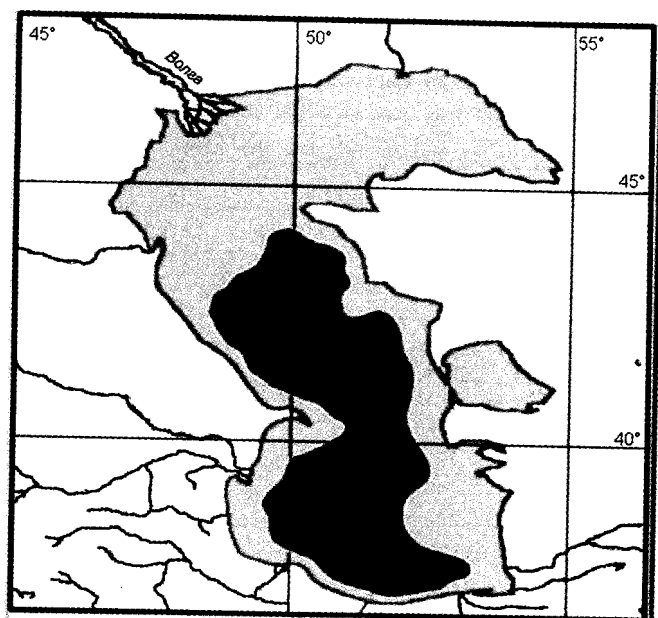


Рис. 1. Площадь Каспийского моря в эпоху позднеплейстоценового криохрона, вычисленная в результате численных экспериментов с моделями РМІР (темный цвет), в сравнении с современной

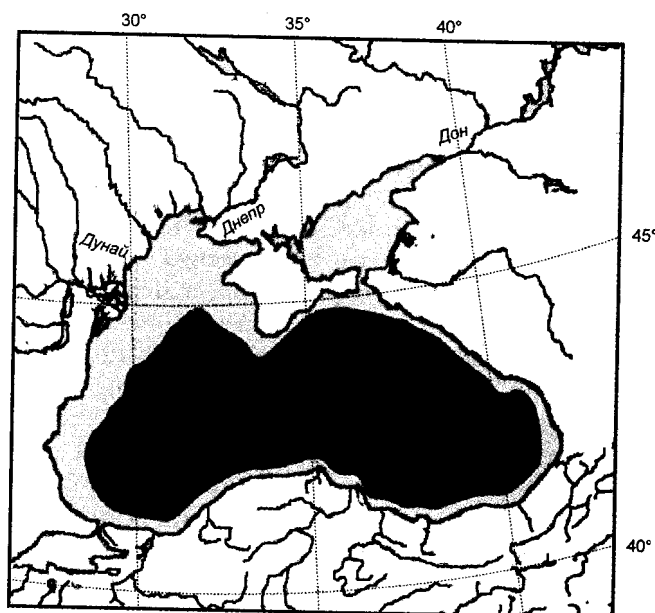


Рис. 2. Площадь Черного моря в эпоху позднеплейстоценового криохрона, вычисленная в результате численных экспериментов с моделями РМІР (темный цвет), в сравнении с современной

лями РМІР воссозданы основные наблюдавшиеся особенности [7, 19, 22, 23]. По данным “лучших” моделей на территории ВЕР выпадало осадков на 30–40% меньше, чем в настоящее время, а объем годового стока как в Черное, так и в Каспийское море уменьшился примерно на 50% (доля стока р. Волги составила 72%) [8]. Межмодельный разброс воспроизведенного слоя стока составляет 20–25%, так что полученная аномалия статистически значима. По данным палеогидрологических реконструкций изменения получились несколько меньше: во время енотаевской регрессии суммарный сток в Каспий мог составлять 20–30% от современного [1]; сток рек южного склона европейской территории России уменьшался в эпохи последнего оледенения на 20–25% [10].

За счет уменьшения объема стока площадь, занимаемая Каспийским морем 21 тыс. л.н., должна была уменьшиться вдвое по сравнению с современной (см. (2)). Эта картина представлена на рис. 1 — береговая линия соответствует современной изобате –80 м, т.е. рассчитанный уровень моря примерно на 50 м ниже современного. Уровень Черного моря при заданном сокращении стока должен был опуститься на 200 м ниже современного (рис. 2), при этом море превращается в бессточный водоем. Отметим, что движения вод из Средиземного в Черное море также не было, поскольку уровень Мирового океана снижался в это время примерно на 100 м. Получившиеся абсолютные значения снижения уровней близки к реконструированным отметкам максимального регрессионного состояния Черного и Каспийского морей [1, 6].

Рассмотрим вклад других факторов в изменения уровня (см. (2)). В некоторых работах [4] развиваются представления о том, что в Каспий могли проникать воды сибирских рек, запруженных в нижнем течении шельфовыми ледниками. Однако четких палеогеографических подтверждений этого феномена пока не имеется. Рассмотрим величину $\Delta e/e_0$. Обычно при по-

нижении температуры наблюдается уменьшение испарения с поверхности водоема, кроме того, в рассматриваемую холодную эпоху увеличивалась площадь и продолжительность распространения морских льдов, что также должно было приводить к снижению испарения. Это обстоятельство должно было способствовать росту уровня моря по сравнению с современным. Однако количество модельных осадков существенно снизилось над акваториями Черного и Каспийского морей [8], что должно было вызвать противоположный эффект. Можно уверенно считать, что изменений, сравнимых с влиянием вариаций речного стока, названные эффекты вызвать не могли.

Полученные результаты позволяют лучше понять и обосновать синхронность событий, отмечающихся в различных региональных палеогеографических шкалах. Дело в том, что по сути рассмотренной задачи моделями воспроизводился пик планетарного похолодания и гляциальных условий поздневалдайского похолодания, которое в свою очередь параллелизуется со 2-й морской изотопной стадией [5]. Результаты моделирования не обязательно строго относятся именно к временному срезу 21 тыс. л.н., поскольку принятые граничные условия могут быть распространены (особенно в условиях их неполной определенности) на некоторый диапазон времени. Это, в частности, относится и к инсоляции, которая изменялась плавно [15]. В этом контексте разумно соотнести максимум похолодания с регрессионным состоянием Каспийского моря (ательская регрессия) и Черного моря (посткарангатская регрессия).

Заключение. В работе проанализированы результаты математического моделирования (осуществленного в рамках РМІР) изменений уровня Черного и Каспийского морей в контрастных климатических эпохах. Показано, что в период максимума позднеплейстоценового криохрона речной сток с Восточно-

Европейской равнины, приносящий воду в рассматриваемые моря, сократился на 50%. Это привело к падению уровней Черного и Каспийского морей на

200 и 50 м соответственно. Данный модельный результат проявился как отклик регионального водного бюджета на глобальное похолодание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варущенко С.И., Варущенко А.Н., Клиге Р.К. Изменение режима Каспийского моря и бессточных водоемов в палеовремене. М., 1987.
2. Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав подземных льдов. Т. 1. М., 1992.
3. Величко А.А., Климанов В.А., Беляев А.В. Реконструкция стока Волги и водного баланса Каспия в оптимуме микулинского межледниковья и голоцена // Изв. РАН. Сер. геогр. 1988. № 1.
4. Гросвальд М.Г. Евразийские гидросферные катастрофы и оледенение Арктики. М., 1999.
5. Каплин П.А., Свиточ А.А., Судакова Н.Г. Материковые оледенения и окраинные морские бассейны России в плейстоцене // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2005. № 1.
6. Каплин П.А., Щербаков Ф.А. Реконструкции палеогеографических обстановок на шельфе в позднечетвертичное время // Изв. РАН. Сер. Океанология. 1986. № 6.
7. Кислов А.В. Климат в прошлом, настоящем и будущем М., 2001.
8. Кислов А.В., Торопов П.А. Моделирование вариаций речного стока Восточно-Европейской равнины при различных климатах прошлого // Изв. РАН. Сер. Водные ресурсы. 2006. № 3.
9. Клиге Р.К., Данилов И.Д., Конищев В.Н. История гидросферы. М., 1998.
10. Палеогеография Северной Евразии в позднем плейстоцене—голоцене и проблемы географического прогноза. М., 1978.
11. Рычагов Г.И. Уровненный режим Каспийского моря за последние 10 000 лет // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2003. № 2.
12. Свиточ А.А. Морской плейстоцен побережий России. М., 2003.
13. Тарасов П.Е., Гунова В.С., Успенская О.Н. Уровни озер бассейна Волги как индикатор изменения климата в голоцене // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1997. № 3.
14. Торопов П.А. Оценка качества воспроизведения моделями общей циркуляции атмосферы климата Восточно-Европейской равнины // Метеорология и гидрология. 2005. № 5.
15. Berger A. Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes // J. Atmos. Sci. 1978. Vol. 35. P. 390—403.
16. Dyke A.S., Prest V.K. Late Wisconsinan and Holocene history of the Laurentide ice sheet // Géographie Physique Quaternaire. 1987. Vol. 41. P. 237—263.
17. Guiot J., Harrison S.P., Prentice I.C. Reconstruction of Holocene precipitation patterns in Europe using pollen and lake-level data // Quatern. Res. 1993. Vol. 40. P. 139—149.
18. Hostetler S.W., Mix A.C. Reassessment of ice-age cooling of the tropical ocean and atmosphere // Nature. 1999. Vol. 399. N 6737. P. 673—676.
19. Joussaume S. Modeling extreme climates of the past 20,000 years with general circulation models // Modeling the Earth's Climate and Its Variability. Amsterdam, 1999. P. 527—565.
20. Joussaume S., Taylor K. Status of the paleoclimate modeling intercomparison project (PMIP) // WCRP 92. WMO/TD 732. Geneva, 1995.
21. Kislov A.V., Sourkova G.V. Simulation of the Caspian Sea level changes during last 20 000 years // Palaeohydrology and environmental change. Chichester, 1998. P. 235—246.
22. Kislov A.V., Tarasov P.E., Sourkova G.V. Pollen and other proxy-based reconstructions and PMIP simulations of the Last Glacial Maximum mean annual temperature: an attempt to harmonize the data — model comparison procedure // Acta Palaeontol. Sinica. 2002. Vol. 41. P. 539—545.
23. Kohfeld K.E., Harrison S.P. How well can we simulate past climates? Evaluating the models using global palaeoenvironmental datasets // Quaternary Sci. Rev. 2000. Vol. 19. P. 321—346.
24. Peltier D.R. Ice age paleotopography // Science. 1994. Vol. 265. P. 195—201.
25. Raynaud D., Jouzel J., Barnola J.M. et al. The ice record of greenhouse gases // Science. 1993. Vol. 259. P. 926—934.
26. Sarnthein M., Stettenger K., Dreger D. et al. Fundamental modes and abrupt changes in North Atlantic circulation and climate over the last 60 ky — Concepts, reconstruction, and numerical modelling // The Northern North Atlantic: A Changing Environment. Berlin, 2001. P. 364—410.
27. Svensson N.O. Postglacial land uplift patterns of South Sweden and the Baltic Sea region // Terra Nova. 1991. Vol. 3. P. 369—378.

Кафедра метеорологии и климатологии

Поступила в редакцию
19.01.2006

A.V. Kislov, P.A. Toropov

MODELING OF CHANGES OF THE BLACK AND CASPIAN SEA LEVELS UNDER DIFFERENT CLIMATES OF THE PAST

The results of mathematical modeling of changes of the Black and Caspian Sea levels during contrasting climatic epochs performed under the PMIP are analyzed. During the maximum of the Late Pleistocene ice age the river flow from the East-European Plain was 50% less, thus resulting in the fall of the Black and Caspian Sea levels by 200 and 50 m respectively. The decreasing sea level was the response of the regional water budget to the global cooling. Thus the synchronism of the planetary temperature falls and the regressions of the Black and Caspian Seas is proved.