——— ПАЛЕОГИДРОЛОГИЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ ———

УДК 551.461.2

ВОДНЫЙ БАЛАНС КАСПИЙСКОГО МОРЯ В ЭПОХУ ПОСЛЕДНЕГО ЛЕДНИКОВОГО МАКСИМУМА ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МАТЕМАТИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ¹

© 2021 г. П. А. Морозова^{*a*, *}, К. В. Ушаков^{*b*}, В. А. Семенов^{*a*, *c*, *d*}, Е. М. Володин^{*e*}

^а Институт географии РАН, Москва, 119017 Россия ^bИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997 Россия ^cИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, 119017 Россия ^dИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия ^eИнститут вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, 119333 Россия *e-mail: morozova_polina@mail.ru Поступила в редакцию 21.04.2021 г. После доработки 21.04.2021 г. Принята к публикации 24.05.2021 г.

Рассмотрено изменение водного баланса Каспийского моря в эпоху последнего ледникового максимума (ПЛМ, ~21 тыс. лет назад) по сравнению с доиндустриальными условиями (~1850 г.) по данным климатического моделирования проектов PMIP4-СМІР6. Для оценки изменения испарения с поверхности Каспия и объемов речного стока, необходимого для поддержания равновесного состояния озера в различных климатических условиях и при различных уровнях озера, также использована региональная конфигурация океанической вихреразрешающей модели ИВМИО-СІСЕ. В качестве атмосферных граничных условий в океанической модели использованы результаты экспериментов климатической модели INMCM по воспроизведению климата ПЛМ и климата преиндустриального периода. Согласно данным моделирования РМІР4, в эпоху ПЛМ как сток Волги, так и испарение с поверхности Каспия уменьшились по сравнению с контрольным экспериментом. Межмодельный разброс оценок велик: от -5 до -50% для Волги, и от -2 до -20% для Каспия. Такие результаты не позволяют сделать однозначных выводов о регрессивном или трансгрессивном положении Каспия в период ПЛМ, однако исключают глубокую регрессию Каспия. Даже в случае оценки уровня Каспия с использованием результатов модели, продемонстрировавшей максимальное уменьшение стока Волги, объема речного стока с территории водосбора Каспия будет достаточно для поддержания уровня Каспийского моря не ниже отметки -45 м над уровнем моря.

Ключевые слова: Каспийское море, палеоклиматическое моделирование, колебания уровня, модель общей циркуляции моря.

DOI: 10.31857/S0321059621060134

введение

Современные палеогеографические данные свидетельствуют о масштабных колебаниях уровня Каспия в эпоху позднеледниковья, однако на сегодняшний день не существует единого мнения ни о датировках, ни о возможных механизмах этих событий [1, 3, 11]. По мнению авторов [6], трансгрессивная стадия заканчивалась в позднем плейстоцене, а в начале голоцена наблюдалась регрессия. В [7] высказана точка зрения, что трансгрессия продолжалась и в раннем голоцене, падение же началось в середине голоцена. Также стоит отметить, что масштабы этих колебаний окончательно не определены. Большинство исследователей сходится в том, что амплитуда колебаний уровня Каспия в позднеледниковье была 30—40 м. В последнее время появляется много новых данных и методов, позволяющих надеяться на уменьшение неопределенности в этих вопросах [11, 12].

Часть гипотез, объясняющих столь существенные изменения уровня Каспия, связана с колебаниями климата в позднеледниковье. К ним мож-

¹ Работа выполнена при поддержке РНФ (проект 19-17-00215, оценка результатов проекта РМІР4), госзадания ИГРАН (тема 0148-2019-0009, моделирование климата ПЛМ с использованием модели INMCM) и госзадания ИО РАН (тема 0128-2021-0003, разработка версии модели ИВМИО-СІСЕ для Каспийского моря и атмосферных данных INMCM).

Название модели (обозначение в статье), ссылка	Число ячеек (долгота × широта)	Продолжительность эксперимента (лет)	Реконструкция оледенения, используемая в эксперименте	Динамическая растительность	Каспийское море задано как суша/океан
AWI-ESM-1-1-LR (AWI), [23]	192 × 96	PI – 100 LGM – 100	ICE-6G_C	Есть	Океан
INM-CM4-8 (INMCM), [26]	180 × 120	PI – 531 LGM – 200	ICE-6G_C	Нет	Океан
MIROC-ES2L (MIROC), [16]	128 × 64	PI - 500 LGM - 100	ICE-6G_C	Нет	Суша
MPI-ESM1-2-LR (MPI), [22]	192 × 96	PI — 1000 LGM — 100	ICE-6G_C	Нет	Океан

Таблица 1. Информация о моделях

но отнести изменение условий увлажнения на территории водосбора, изменение стока из-за появления вечной мерзлоты и изменения свойств грунтов, а также возможный лелниковый сток со Скандинавского щита. В данной работе использованы данные климатического моделирования проекта PMIP4 (Paleoclimate Modelling Intercomparison Project), чтобы оценить потенциально возможные изменения уровня Каспийского моря, связанные с изменениями условий увлажнения на территории водосбора Каспия в эпоху максимума последнего оледенения (ПЛМ, ~21 тыс. лет назад (л. н.)). Оценка компонентов водного баланса Каспия по данным палеоклиматического моделирования проводилась и ранее для предыдущих стадий проекта PMIP [4, 8, 9, 20]. Принципиальное отличие данной работы — дополнительное использование океанической модели высокого разрешения, что позволило корректнее оценить и испарение с поверхности Каспия, и необходимые объемы стока для поддержания уровня озера на различных отметках, поскольку на сегодняшний день нет однозначных данных о положении уровня Каспийского моря в эпоху ПЛМ.

ДАННЫЕ КЛИМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для анализа использованы результаты экспериментов piControl и LGM (Last Glacial Maximum), выполненных в рамках проектов РМІР4 и СМІР6 [14], доступные в [17] (табл. 1). Эксперимент piControl (контрольный эксперимент (далее – PI)) – базовый с фиксированным содержанием парниковых газов, аэрозолей и малых газовых примесей на доиндустриальном уровне (~1850 г.). В эксперименте LGM воспроизводится климат максимума последнего оледенения — периода с максимальным объемом ледникового покрова (~21 тыс. л. н.) в течение последней ледниковой эпохи (19-25 тыс. л. н.). Ключевые особенности этого эксперимента — общее увеличение

объемов оледенения, появление покровных ледников на территории Евразии и Северной Америки, понижение уровня моря (на 115—130 м) и связанные с этим изменения топографии и конфигурации суши. Также в соответствии с данными реконструкций задаются орбитальные параметры и газовый состав атмосферы. В рамках эксперимента возможно использование нескольких реконструкций ледниковых щитов. Более подробно граничные условия для эксперимента LGM представлены в [19].

ОЦЕНКА КОМПОНЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Каспийское море — крупный бессточный водоем, его уровень определяется балансом между речным стоком и эффективным испарением (разницей между осадками и испарением) с поверхности озера.

Речной сток

В данной работе рассмотрены сток Волги и сток рек Кавказского региона, так как в сумме они дают >90% речного стока, поступающего в Каспий, где на долю Волги приходится в среднем ~80% интегрального стока [10]. В данном случае авторы анализируют климатический сток (разницу между модельными осадками и испарением), чтобы оценить изменение режима увлажнения на территории водосбора Каспия, и непосредственно такой выходной параметр климатической модели, как речной сток (табл. 2). Использование только модельного речного стока при оценке стока Волги может быть не совсем корректно для настоящего исследования, так как в части моделей в этой переменной учитываются талые воды Скандинавского ледника, поскольку, согласно использованным в модельных экспериментах, данным реконструкций оледенения, северо-западная часть бассейна Волги – это периферия Сканди-

Источник данных	Период	Осадки, км ³ /год	Испарение, км ³ /год	Сток климатический, км ³ /год	Сток модельный, км ³ /год	Площадь водосбора, км ²
Волга [10]		873 (642 мм)	621 (457 мм)	252 (185 мм)		1380000
AWI	PI	1028 (602 мм)	850 (497 мм)	178 (105 мм)	175 (103 мм)	1708500
	LGM	839 (491 мм)	670 (392 мм)	169 (99 мм)	166 (97 мм)	
	LGM-PI	-189 (-18%)	-180 (-21%)	-9 (-5%)	-9 (5%)	
INMCM	PI	1009 (568 мм)	748 (421 мм)	261 (147 мм)	262 (147 мм)	1776670
	LGM	495 (278 мм)	367 (206 мм)	128 (72 мм)	138 (78 мм)	
	LGM-PI	-514 (-50%)	-381 (-50%)	-133 (-50%)	-123 (-47%)	
MIROC	PI	1099 (650 мм)	874 (517 мм)	225 (133 мм)	222 (131 мм)	1692000
	LGM	776 (459 мм)	562 (332 мм)	214 (127 мм)	210 (125 мм)	
	LGM-PI	-323 (-29%)	-312 (-36%)	-11 (-5%)	-12 (-5%)	
MPI	PI	1293 (767 мм)	963 (571 мм)	330 (196 мм)	328 (194 мм)	1686000
	LGM	828 (491 мм)	674 (400 мм)	154 (91 мм)	151 (90 мм)	
	LGM-PI	-465 (-36%)	-289 (-30%)	-176 (-53%)	-177 (-54%)	

Таблица 2. Изменение компонентов речного стока Волги по данным наблюдений и моделирования РМІР4 (мм – мм в слое, % – по сравнению контрольным экспериментом)

навского щита. Также стоит отметить, что не все рассматриваемые модели содержат динамический блок растительности и что характеристики подстилающей поверхности для эксперимента lgm задавались такими же, как и в контрольном эксперименте. Изменение этих параметров в ПЛМ могло существенно повлиять на объемы речного стока.

Бассейн Волги и для контрольного эксперимента, и для эксперимента LGM задавался в современных границах. При интерполяции границ водосборного бассейна Волги на модельные сетки площадь водосбора Волги оказалась больше реальной в среднем на 20%, поэтому для сравнения с данными наблюдений стоит в большей степени ориентироваться на представленные в табл. 2 величины компонентов речного стока, пересчитанные в миллиметры слоя. Все модели продемонстрировали снижение как испарения (21-50%), так и осадков (18-50%) на территории водосбора Волги, что привело к снижению климатического стока (5-50%). В моделях AWI и МІ-ROC дефицит осадков практически был скомпенсирован уменьшением испарения, поэтому сток уменьшился всего на 5%, в INMCM и MPI этого не произошло, что привело к уменьшению стока вдвое. Различия между слоем стока, рассчитанным как разность между осадками и испарением, и модельным речным стоком оказались малы, только в модели INMCM модельный речной сток выше климатического на 10 км³/год в эпоху ПЛМ, что связано как раз с вкладом ледниковых вод.

Все модели демонстрируют максимальное уменьшение слоя стока в северных частях водосбора Волги, что связано с их близостью к ледниковому щиту (рис. 1), в то время как для низовий Волги и рек Кавказа можно говорить даже о более влажных условиях в ПЛМ.

Баланс влаги на поверхности Каспийского моря

Не менее важный компонент водного баланса Каспия, помимо речного стока, – испарение с поверхности озера. В некоторых глобальных климатических моделях Каспийское море задается как "море", т.е. в этих ячейках решается система океанических уравнений и происходит образование морского льда. В части моделей Каспий не задается в маске как "море", а рассматривается как ячейки суши, полностью занятые водой, т.е. в данном случае не учитывается внутренняя динамика водоема, а принимается во внимание только изменение свойств поверхности суши, что важно для корректного воспроизведения климата региона. Однако ни в одном случае уравнение водного баланса для озера не решается и площадь Каспия не меняется, а задается постоянной в начале эксперимента и не зависит от объемов речного стока и водного баланса на поверхности. К тому же пространственное разрешение климатических моделей не позволяет задать акваторию и батиметрию озера детально. Низкое разрешение приводит к ошибкам в воспроизведении трехмерной циркуляции и термохалинной структуры вод, которые и определяют распределение и суммарную интенсивность испарения с поверхности моря. Поэтому для определения масштабов колебаний



Рис. 1. Изменение речного стока (мм/год) в эпоху ПЛМ по сравнению с контрольным экспериментом по данным моделей РМІР4.

Каспийского моря необходима модель высокого разрешения, учитывающая морфометрические особенности водоема и способная воспроизводить такие процессы, как интенсивные круговороты и меридиональная опрокидывающая циркуляция, резкие градиенты поверхностной температуры и соответствующие изменения потоков тепла между морем и атмосферой, прибрежный апвеллинг и, по крайней мере в параметризованном виде, конвективное перемешивание. От точности модели льда и его взаимодействия с морем зависит площадь испарения в холодный период и продолжительность сезона открытой воды в теплый период.

Для уточнения слоя испарения с Каспийского моря и объемов речного стока, необходимого для поддержания равновесного состояния озера в различных климатических условиях, использована вихреразрешающая океаническая модель ИВМИО, объединенная с моделью морского льда СІСЕ.

Модель ИВМИО аппроксимирует систему трехмерных уравнений динамики и термодинамики океана в приближениях Буссинеска, гидростатики и несжимаемости воды методом конечных объемов на сетке типа *B* в вертикальных *z*-координатах. Численная реализация модели описана в [25]. В данной работе использована регулярная горизонтальная модельная сетка с разрешением 0.27° по долготе и 0.2° по широте, что соответствует размеру ячейки ~22 км на широтах Каспийского моря. Шаг по времени равен 20 мин. Вертикальная дискретизация включает 28 горизонтов с шагом от 6 м в верхнем слое до 125 м в



Рис. 2. Конфигурация Каспийского моря в модели ИВМИО-СІСЕ для экспериментов с различным уровнем моря.

глубине. Испарение и поверхностные турбулентные потоки тепла и импульса рассчитываются исходя из значений температуры и удельной влажности воздуха и скорости ветра с помощью балкформул [21]. Граничные условия включают в себя также интенсивность осадков и потоки приходящей длинноволновой и коротковолновой радиации. Горизонтальные обмены описаны с помощью бигармонического оператора для импульса и оператора Лапласа для температуры и солености с номинальными (экваториальными) коэффициентами -1.5×10^{11} м⁴/с и 300 м²/с соответственно. Модель динамики и термодинамики льда СІСЕ [18] в приближении нулевого слоя используется на сетке того же разрешения и с тем же шагом по времени, что и модель океана. Построение совместной модели ИВМИО-СІСЕ описано в [15].

Расчеты проводились для различных уровней Каспия: -60, -45, -30, -15 м над уровнем моря (м н. у. м.) относительно современного уровня Мирового океана (рис. 2). В качестве исходной метеорологической информации использованы данные суточного разрешения экспериментов модели INMCM по воспроизведению доиндустриального климата и климата LGM.

Эксперимент был организован следующим образом: при каждом уровне озера задавалось начальное приближение для величины речного стока как эмпирическая линейная функция от площади акватории (для эксперимента с уровнем -30 м н. у. м. и прединдустриальными атмосферными условиями она соответствует данным наблюдений). После этого для периода 20 лет проводился счет с использованием данных климатического моделирования INMCM (эксперименты piControl, LGM) и вычислялся водный дисбаланс, средний за 6-20 лет. Затем объем речного стока корректировался на эту величину дисбаланса, и счет продолжался еще на 30 лет в условиях сбалансированного состояния Каспия. В итоге анализировались полученные поля испарения, средние за последние 20 лет. Полученные объемы речного стока, необходимого для сбалансированного состояния Каспийского моря при различ-



Рис. 3. Объем речного стока, необходимого для равновесного состояния Каспийского моря при различных уровнях для климата доиндустриального и LGM, по данным ИВМИО-СІСЕ и INMCM.

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ том 48 № 6 2021

Источник данных	Эксперимент	Осадки, мм/год	Испарение, мм/год
AWI	PI	188	1124
	LGM	178	1065
INM-CM48	PI	248	1044
	LGM	204	1022
MIROC	PI	438	836
	LGM	356	673
MPI	PI	249	1114
	LGM	241	936
ИВМИО-CICE + INM-CM48	PI	248 (INM-CM48)	918
	LGM	204 (INM-CM48)	760
Наблюдения [2]	_	215 ± 50	980 ± 20

Таблица 3.	Осадки и испарение над акваторией к	Саспия по данным моделирования и наблю	дений
------------	-------------------------------------	--	-------

ных уровнях для доиндустриального климата и климата LGM, представлены на рис. 3.

Проведенные эксперименты позволяют более корректно, чем при использовании данных глобальных климатических моделей, оценить объемы испарения с поверхности Каспия в различных климатических условиях. А также получить зависимость объемов испарения от уровня Каспия, которая в силу морфологических особенностей озера (существенное увеличение площади мелководной зоны при уровне выше – 30 м н. у. м.) имеет нелинейный характер.

Как видно из табл. 3, большинство моделей демонстрирует снижение испарения с поверхности озера. По данным моделирования, среднегодовые значения температуры над Каспием в ПЛМ были ниже современных на 5–7°С; соответственно, это привело к уменьшению и периода открытой воды, и летнего испарения. Количество осадков также уменьшилось, но не существенно.

ИЗМЕНЕНИЕ УРОВНЯ КАСПИЯ

Полученная зависимость уровня Каспия от объемов испарения с его поверхности и равновесного речного стока позволяет оценить возможные изменения уровня Каспийского моря в эпоху ПЛМ с использованием данных климатического моделирования проекта РМІР4. Модели продемонстрировали большой разброс: половина моделей воспроизвела сток Волги в ПЛМ близким к доиндустриальному, другая — его понижение на 40-50%. Полученный диапазон стока Волги в эпоху ПЛМ в абсолютных величинах составил 72-127 мм, что соответствует 100-176 км³/год (при пересчете на площадь водосбора – 1380000 км²). Если рассматривать изменение стока в ПЛМ как отклонение от современного наблюденного стока, то сток Волги в ПЛМ составит 125–240 км³/год.

Также необходимо учесть сток других рек, помимо Волги. Реки Кавказа (Терек, Сулак, Кура) дают ~30, Урал ~8 км³/год [10]. Эти реки суммарно с учетом Волги обеспечивают 95% речного стока в Каспий [10]. Абсолютные значения стока горных рек в глобальных климатических моделях занижены из-за невозможности в полной мере учесть орографический фактор (низкое разрешение, гидростатическое приближение), поэтому стоит ориентироваться на относительные изменения объемов стока в регионе, для всех моделей они ≤20%, т. е. суммарный сток рек Кавказа колеблется в диапазоне 25-35 км³/год, причем большинство моделей лемонстрирует даже увеличение стока в этом регионе. Таким образом, минимальные оценки речного стока в Каспий составляют ~145, максимальные ~280 км³/год. Согласно расчетам с использованием модели ИВМИО-СІСЕ, эти объемы речного стока в ПЛМ соответствуют уровням Каспия ~ -45 и ~ -20 м н. у. м.

Помимо климатического речного стока, компонентом водного баланса Каспия мог быть сток талых ледниковых вод Скандинавского щита, граница которого проходила в верховьях Волги. Отдельно оценка слоя стаивания по данным моделирования не проводилась. В модели INMCM слой стока в ячейках на периферии щита составляет 600-800 мм/год, в моделях MPI и AWI он не рассчитывается. Основываясь на оценках в [5, 24], примем объем талых вод, поступающих в Волгу, за ~50 км³/год; в этом случае возможный диапазон уровней Каспия следующий: чуть ниже -30 м н. у. м. при минимальных и > -15 м н. у. м. при максимальных оценках объема речного стока (для уточнения максимально высокого уровня Каспия необходимо провести дополнительные эксперименты с моделью ИВМИО-СІСЕ для значений уровня Каспия > -15 м н. у. м.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Небольшое число моделей и значительный межмолельный разброс значений компонентов водного баланса Каспия не позволяют однозначно определить – в трансгрессивной или регрессивной фазе в период ПЛМ находилось Каспийское море. Все модели продемонстрировали уменьшение и осадков, и испарения в бассейне Волги в эпоху ПЛМ, в некоторых моделях понижения этих компонентов скомпенсировали друг друга и сток практически не изменился, в других же это привело к снижению стока вдвое. Для территории водосбора рек Кавказа (Сулак, Кура, Терек) условия увлажнения в ПЛМ изменились мало, большинство моделей даже воспроизвело небольшое увеличение слоя стока. Дополнительную неопределенность при расчете общих объемов стока в Каспий в период ПЛМ вносит оценка объема ледникового стока со Скандинавского щита. В данной работе слой стаивания по данным моделирования не рассчитывался, необходимо сделать это в будушем с уточнением по палеогеографическим данным возможных областей ледникового щита, с которых происходил сток в Волгу. Указанные выше причины не позволяют сделать однозначных выводов о положении Каспия в период ПЛМ, однако полученные результаты с высокой степенью вероятности исключают глубокую регрессию Каспийского моря. Даже в случае оценки уровня Каспия с использованием результатов модели INMCM, продемонстрировавшей максимальное уменьшение стока Волги, объема речного стока с территории водосбора Каспия будет достаточно для поддержания уровня Каспийского моря не ниже отметки –45 м н. v. м.

Величины объемов испарения и речного стока, необходимые для поддержания равновесного состояния Каспия при разных уровнях и климатических условиях, полученные с использованием океанической модели высокого разрешения, воспроизводящей трехмерную циркуляцию водоема и динамику льда, могут быть полезны не только при оценке модельных результатов, но и при палеогеографических реконструкциях. Стоит отметить, что объемы равновесного речного стока существенно различаются для современного климата и климата ПЛМ, особенно для уровней Каспия выше современного. В будущем планируется проведение дополнительных экспериментов для уровней Каспия > –15 м н. у. м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Варущенко С.И., Варущенко А.Н., Клиге Р.К. Изменение режима Каспийского моря и бессточных водоемов в палеовремени. М.: Наука, 1987. 238 с.
- Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря: моделирование и прогноз. М.: Триада лтд, 2016, 378 с.

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ том 48 № 6 2021

- 3. *Квасов Д.Д.* Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. Л.: Наука, 1975. 278 с.
- 4. *Морозова П.А.* Влияние Скандинавского ледника на климатические условия восточно-европейской равнины по данным численного моделирования проекта РМІР ІІ // Лед и снег. 2014. № 1 (125). С. 113–124.
- Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Украинцев В.Ю. Ледниковый сток Волги в поздневалдайскую эпоху (МИС2) и его роль в водном бюджете Каспия // Актуальные проблемы палеогеографии плейстоцена и голоцена. Материалы Всерос. конф. с международ. участием "Марковские чтения" 2020 года. М.: Географ. фак. МГУ, 2020. С. 299–302.
- 6. *Рычагов Г.И*. Плейстоценовая история Каспийского моря. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1997. 267 с.
- 7. *Свиточ А.А.* Уровенный режим Каспийского моря по палеогеографическим данным // Вод. ресурсы. 1997. Т. 24. № 1. С.13–22.
- 8. *Торопов П.А., Кислов А.В.* Моделирование вариаций стока рек Восточно-Европейской равнины в разных климатических условиях прошлого // Вод. ресурсы. 2006. № 5. С. 515–526.
- 9. Торопов П.А., Морозова П.А. Оценка колебаний уровня Каспийского моря в эпоху позднеплейстоценового криохрона по результатам численного моделирования климата // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, География. 2011. № 2. С. 55–61.
- Устья рек каспийского региона: история формирования, современные гидролого-морфологические процессы и опасные гидрологические явления / Под ред. В.Н. Михайлова. М.: ГЕОС, 2013. 700 с.
- Янина Т.А. Неоплейстоцен Понто-Каспия: биостратиграфия, палеогеография, корреляция. М.: Географ. фак. МГУ, 2012. 264 с.
- Arslanov Kh.A., Yanina T.A., Chepalyga A.L., Svitoch A.A., Makshaev R.R., Maksimov F.E., Chernov S.B., Tertychnyi N.I., Starikova A.A. On the age of the Khvalynian deposits of the Caspian Sea coasts according to 14C and 230Th/234U methods // Quaternary Int. 2016. № 409. P. 81–87.
- Chepalyga A. The Late Glacial Great Flood in the Ponto-Caspian basin // The Black Sea Flood Question: Changes in Coastline, Climate, and Human Settlement / Eds Yanko-Hombach V., Gilbert A.S., Panin N., Dolukhanov P.M. Berlin: Springer, 2007. P. 119–148.
- Earth System Documentation. https://view.es-doc. org/index.html?renderMethod=id&project=cmip 6&id=8c42ab00-1ef2-4d5b-ade1-8bf8803cb6d4 (дата обращения: 10.03.2021)
- Fadeev R., Ushakov K., Tolstykh M., Ibrayev R. Design and development of the SLAV-INMIO-CICE coupled model for seasonal prediction and climate research // Russian J. Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2018. V. 33(6). P. 333–340.
- 16. Hajima T., Watanabe M., Yamamoto A., Tatebe H., Noguchi M.A., Abe M., Ohgaito R., Ito A., Yamazaki D., Okajima H., Ito A., Takata K., Ogochi K., Watanabe S., Kawamiya M. Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochem-

ical processes and feedbacks // Geosci. Model Dev. 2020. V. 13. P. 2197–2244.

- 17. https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/ (дата обращения: 10.03.2021)
- Hunke E.C., Lipscomb W.H., Turner A.K., Jeffery N., Elliott S. CICE: the Los Alamos Sea Ice Model. Documentation and Software User's Manual Version 5.1. Los Alamos National Laboratory. 2015. http:// www.ccpo.odu.edu/~klinck/Reprints/PDF/cicedoc2015.pdf [Электронный ресурс]. (дата обращения: 10.03.2021)
- Kageyama M., Albani S., Braconnot P., Harrison S.P., Hopcroft P.O., Ivanovic R.F., Lambert F., Marti O., Peltier W.R., Peterschmitt J.-Y., Roche D.M., Tarasov L., Zhang X., Brady E.C., Haywood A.M., LeGrande A.N., Lunt D.J., Mahowald N.M., Mikolajewicz U., Nisancioglu K.H., Otto-Bliesner B.L., Renssen H., Tomas R.A., Zhang Q., AbeOuchi A., Bartlein P.J., Cao J., Li Q., Lohmann G., Ohgaito R., Shi X., Volodin E., Yoshida K., Zhang X., Zheng W. The PMIP4 contribution to CMIP6 – Part 4: Scientific objectives and experimental design of the PMIP4-CMIP6 Last Glacial Maximum experiments and PMIP4 sensitivity experiments // Geosci. Model Dev. 2017. V. 10. P. 4035–4055.
- Kislov A.V., Panin A., Toropov P. Current status and palaeostages of the Caspian Sea as a potential evaluation tool for climate model simulations // Quaternary Int. 2014. V. 345. P. 48–55.
- Launiainen J., Vihma T. Derivation of turbulent surface fluxes – an iterative flux-profile method allowing arbitrary observing heights // Environ. Software. 1990. V. 5(3). P. 113–124.
- Mauritsen T., Bader J., Becker T., Behrens J., Bittner M., Brokopf R., Brovkin V., Claussen M., Crueger T., Esch M., Fast I., Fiedler S., Fläschner D., Gayler V., Giorgetta M., Goll D.S., Haak H., Hagemann S., Hedemann C., Ho-

henegger C., Ilyina T., Jahns T., Jimenéz-de-la-Cuesta D., Jungclaus J., Kleinen T., Kloster S., Kracher D., Kinne S., Kleberg D., Lasslop G., Kornblueh L., Marotzke J., Matei D., Meraner K., Mikolajewicz U., Modali K., Möbis B., Müller W.A., Nabel J.E.M.S., Nam C.C.W., Notz D., Nyawira S., Paulsen H., Peters K., Pincus R., Pohlmann H., Pongratz J., Popp M., Raddatz T.J., Rast S., Redler R., Reick C.H., Rohrschneider T., Schemann V., Schmidt H., Schnur R., Schulzweida U., Six K.D., Stein L., Stemmler I., Stevens B., Storch J., Tian F, Voigt A., Vrese P, Wieners K., Wilkenskjeld S., Winkler A., Roeckner E. Developments in the MPI-M Earth System Model version 1.2 (MPI-ESM1.2) and its response to increasing CO2 // Adv. Model. Earth Syst. 2019. V. 11. P. 998–1038.

- Sidorenko D., Rackow T., Jung T., Semmler T., Barbi D., Danilov S., Dethloff K., Dorn W., Fieg K., Göβling H.F., Handorf D., Harig S., Hiller W., Juricke S., Losch M., Schröter J., Sein D.V., Wang Q. Towards multi-resolution global climate modeling with ECHAM6–FESOM. Part I: model formulation and mean climate // Clim. Dynam. 2015. V. 44. P. 757–780.
- Panin A., Astakhov V., Komatsu G., Lotsari E., Lang J., Winsemann J. Middle and Late Quaternary glacial lakeoutburst floods, drainage diversions and reorganization of fluvial systems in northwestern Eurasia // Earth-Sci. Rev. 2020. V. 201. P. 103069.
- 25. Ushakov K.V., Ibrayev R.A. Assessment of mean world ocean meridional heat transport characteristics by a high-resolution model // Rus. J. Earth. Sci. 2018. V. 18. P. ES1004.
- Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostrykin S.V., Galin V.Y., Lykossov V.N., Gritsun A.S., Diansky N.A., Gusev A.V., Iakovlev N.G., Shestakova A.A., Emelina S.V. Simulation of the modern climate using the INMCM48 climate model // Russ. J. Numer. Anal. M. 2018. V. 33. P. 367–374.