

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Ткач Алина Алексеевна**

**Палеогеография Каспийского моря в позднем плейстоцене и голоцене на  
основе изотопно-кислородного анализа остракод**

1.6.14 — Геоморфология и палеогеография

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Москва — 2023

Диссертация подготовлена на кафедре геоморфологии и палеогеографии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

**Научный руководитель –** *Янина Тамара Алексеевна*, доктор географических наук, доцент, профессор кафедры геоморфологии и палеогеографии, заведующий НИЛ новейших отложений и палеогеографии плейстоцена географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

**Официальные оппоненты –** *Панин Андрей Валерьевич*, доктор географических наук, доцент, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией эволюционной географии, заведующий отделом палеогеографии четвертичного периода, заместитель директора Института географии РАН  
*Левитан Михаил Аркадьевич*, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геохимии осадочных пород Института геохимии и аналитической химии имени В. И. Вернадского РАН

*Тесакова Екатерина Михайловна*, доктор геолого-минералогических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры региональной геологии и истории Земли геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Защита диссертации состоится «16» ноября 2023 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.4 Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу: г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, Географический факультет, 21 этаж, ауд. 2109.

E-mail: [dissovet.geogr.msu@gmail.com](mailto:dissovet.geogr.msu@gmail.com)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М. В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.4/2667>

Автореферат разослан «5» октября 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета МГУ.016.4,  
кандидат географических наук



Е. Ю. Матлахова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Каспийское море является крупнейшим изолированным водоемом в мире. В его акватории происходили изменения, отражающие как региональные, так и глобальные климатические события. Несмотря на длительную историю изучения Каспия, многие вопросы эволюции бассейна, за исключением существования хрестоматийных крупных трансгрессивно-регрессивных стадий, остаются дискуссионными. Большое их количество касается выбранного для изучения в рамках диссертационного исследования временного интервала, охватывающего конец позднего плейстоцена и голоцен. В настоящее время не существует четко разработанной, достоверно датированной событийной хронологии Каспия, принятой большинством исследователей. Актуальность и необходимость построения обобщенной изотопно-кислородной шкалы для Каспийского моря исходит из потребности разрешить основные вопросы его палеогеографии и выявить климатический отклик в изменениях его уровня во времени.

Важно отметить, что современные представления о развитии Каспия основаны преимущественно на геоморфологическом анализе морских террас и датировании их отложений, а также на материалах прибрежных исследований либо посвящены детальному рассмотрению отдельных районов Каспийского моря. Для подробных и достоверных реконструкций недостаточно обращаться лишь к изучению наземных и мелководных природных архивов, необходимо иметь непрерывную летопись осадконакопления – осадки как трансгрессивных, так и регрессивных фаз, доступных лишь в глубоководных областях Каспия, которым посвящена основная часть диссертации.

Относительно систематики остракод Каспийского моря также нет единства мнений. Два фактора затрудняют палеогеографическую интерпретацию результатов изучения каспийских остракод. Во-первых, многие виды географически ограничены современным Понто-Каспийским регионом. Во-вторых, существует нехватка подробных исследований живых таксонов и исчерпывающих данных о среде их обитания. Выполненное исследование позволяет внести вклад в разработку этой проблемы, а также дополнить сведения об условиях обитания различных видов каспийских остракод.

Стабильные изотопы кислорода являются важным инструментом познания физико-географических и палеогеографических закономерностей. Применительно к озерам и внутренним морям они предоставляют уникальную, детальную запись истории водоема, которую порой невозможно получить иным путем. Тем не менее изучение сложной истории развития Каспийского моря с точки зрения анализа стабильных изотопов не получило широкого распространения до настоящего времени. Палеогеографические изотопные исследования Каспийского моря немногочисленны, что, вероятно, объясняется сложностью изучения изолированных водоемов в целом и сложностью динамики Каспия как такового. Нужно отметить и отсутствие работ по изучению изотопного состава современных каспийских остракод, необходимых для надежных палеореконструкций. К сожалению, труднодоступность глубоководных регионов для исследования без снаряжения крупных междисциплинарных экспедиций, закрытость и разрозненность имеющихся материалов бурения в силу разных причин, будь то реализация коммерческих проектов, поиск полезных ископаемых, конфликт интересов разных стран Каспийского региона, по сей день сковывают работы в этом направлении, в особенности для малых исследовательских групп. В представленном исследовании предпринята попытка внести посильный вклад в разработку проблемы изотопно-кислородной шкалы для важного, с точки зрения палеогеографии, отрезка времени – конца позднего плейстоцена и голоцена.

**Цель** исследования – установление палеогеографической связи между изотопно-кислородной летописью Каспия, его трансгрессивно-регрессивной ритмикой и климатическими изменениями в Северном полушарии в конце позднего плейстоцена и в голоцене на основе изучения микрофауны остракод.

**Основные задачи:**

1) выделение и описание микрофаунистических комплексов остракод, изучение их географического распространения в акватории современного Каспия по материалам донных проб; биостратиграфическое расчленение колонок и керна буровых скважин Среднего и Южного Каспия;

2) выбор оптимального метода пробоподготовки раковин остракод для анализа стабильных изотопов; измерение изотопно-кислородного состава остракод;

3) оценка видоспецифичного изотопного смещения изученных таксонов; анализ влияния физико-географических факторов на формирование изотопно-кислородного состава раковин остракод в современных условиях;

4) построение изотопно-кислородных кривых по изученным материалам, возрастное моделирование, корреляция отложений;

5) создание обобщенной изотопно-кислородной кривой Каспийского моря для конца позднего плейстоцена - голоцена, палеогеографическая и палеоклиматическая интерпретации изотопной летописи.

**Объектом** исследования является современная и ископаемая микрофауна остракод Каспийского моря. **Предметом** исследования служит летопись стабильных изотопов кислорода, заключенная в раковинах остракод.

**Фактический материал, личный вклад автора.** В основу работы положено изучение материалов трех палеонтологических коллекций, содержащих раковины и створки остракод из донных колонок и керна буровых скважин: коллекция Е.А. Гофман, хранящаяся в НИЛ новейших отложений и палеогеографии плейстоцена и содержащая современную и ископаемую микрофауну со всей акватории Каспия; коллекция А. Джавадовой, переданная автору работы для проведения диссертационного исследования, содержащая остракоды из Азербайджанского и Иранского секторов Каспийского моря; коллекция М.А. Зениной, также переданная автору, содержащая современные образцы остракод из донных проб Северного Каспия. Диссертантом выполнен комплекс исследований, включающий микрофаунистический и изотопно-кислородный анализы остракод, а также обобщены литературные материалы, связанные с изученными объектами, с целью создания единой, непротиворечивой картины палеогеографических изменений, которая стала основой построения первой обобщенной изотопно-кислородной кривой Каспийского моря для конца позднего плейстоцена и голоцена. Систематический анализ остракод (более 15 тысяч экземпляров) выполнен при консультации ведущего специалиста по четвертичным каспийским остракодам – к.б.н. М.А. Зениной. Лабораторные измерения стабильных изотопов проведены для 258 образцов в Центре исследований океана GEOMAR (Киль, Германия) и в Приморском центре локального элементного и изотопного анализа ДВГИ ДВО РАН (Владивосток, Россия). Анализ и обобщение полученных данных выполнены лично автором диссертации. Диссертантом также собраны и унифицированы данные о радиоуглеродном возрасте осадков, вмещающих изученную фауну остракод: проведена калибровка дат и возрастное моделирование. Для сопряженного палеогеографического анализа подобраны и изучены различные палеогеографические архивы (морские, озерные и наземные), изотопная запись которых доступна для региональной корреляции (все источники информации указаны в тексте диссертации). В результате выявлен отклик Каспийского моря на изменения локальных, региональных и глобальных факторов со времени последнего ледникового максимума.

**Методология и методика.** С методологической точки зрения исследование основывается на общей концепции палеогеографии – системе представлений о закономерностях пространственно-временных изменений природы, метахронности, неразрывной связи временных и пространственных свойств природы, находящейся в постоянном движении и развитии. В диссертации автор придерживается концепции климатической обусловленности изменений уровня Каспийского моря в позднем плейстоцене и голоцене. Трансгрессивно-регрессивные события в Каспийском море, рассматриваемые в данной работе, как и образование и деградация ледниковых покровов, являются результатом глобальных и региональных климатических процессов.

Главным методом воссоздания палеогеографической картины позднего плейстоцена и голоцена Каспия в рамках данной работы является комплексный (сопряженный) палеогеографический анализ. Используя результаты различных анализов, он позволяет их контролировать, проводить реконструкцию и корреляцию событий, нивелируя возможные ошибки отдельных методов. Основой диссертационного исследования стали микрофаунистический метод изучения остракод, реализованный в рамках концепции региональной обусловленности реконструкций температуры и солености, и изотопно-кислородный метод, в рамках которого проведена корреляция изотопно-кислородных данных с ледниково-межледниковой ритмикой и региональными климатическими особенностями позднего плейстоцена и голоцена. Тем самым обосновывается выделение важнейших и переломных этапов истории Каспийского моря.

**Научная новизна работы.** В диссертационной работе автором проведено микрофаунистическое описание исследованных образцов, уточнение ряда морфологических признаков строения раковин, специфических для тех или иных условий, и впервые применен анализ стабильных изотопов к образцам коллекции – тем самым реализован палеогеографический аспект исследования и внесен существенный вклад в работу над палеонтологическими коллекциями. Особое внимание уделено методическому аспекту анализа стабильных изотопов по раковинам остракод, что также составляет новизну работы, экспериментальному подтверждению законов, распространяющихся на изотопные реконструкции, выявлению наиболее подходящего способа пробоподготовки, выяснению биотических и абиотических факторов, влияющих на изотопно-кислородный состав на примере донных проб, для которых известны необходимые физико-географические параметры водной среды. Такая работа была необходима для обоснования палеогеографических выводов, сделанных по изотопным построениям в регионе. Сбор и обобщение изотопно-кислородных данных по материалам бурения в Каспийском море (сведения единичны и отрывочны) также выполнен впервые. Автором получены изотопно-кислородные кривые по девяти новым колонкам, которые наряду с ранее опубликованными данными стали основой обобщенной изотопной кривой, построенной для Каспийского моря впервые автором диссертационного исследования.

**Теоретическая и практическая значимость исследования.** Ход обобщенной изотопно-кислородной кривой Каспийского моря подтверждает чувствительность Каспия к пространственно-временным климатическим сигналам, тем самым позволяя проводить корреляции в пределах региона. Результаты диссертационной работы могут быть использованы как при составлении единой стратиграфической и палеогеографической схемы Северной Евразии для позднего плейстоцена и голоцена, так и в образовательных целях – в лекционных курсах по палеогеографии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Методические разработки автора применимы в изотопных исследованиях Каспийского моря и других природных

архивов, содержащих аналогичную изученной микрофауну остракод.

**Предмет защиты. Основные защищаемые положения.**

1. Изученные палеосообщества остракод подчиняются закономерностям, установленным для современных каспийских комплексов остракод – их состав диктуется географией и экологией видов и напрямую связан с геоморфологическими и гидрологическими условиями, как в количественном, так и в качественном отношении.

2. Важнейшим фактором, определяющим изотопно-кислородный состав каспийских остракод, является видоспецифичное изотопное смещение. Введение соответствующей поправки позволяет успешно идентифицировать свойства водной массы, в которой происходило формирование раковины, что дает основание для надежных изотопных палеогеографических реконструкций.

3. Во временном интервале последний ледниковый максимум – начало голоцена в Каспийском регионе развивалась единая хвалынская трансгрессия, за которой последовала мангышлакская регрессия: поднятие уровня моря в позднеледниковье сменилось устойчивым регрессивным трендом, осложненным незначительными осцилляциями и фазами стабилизации уровня, нашедшими отражение в пульсационном характере изотопно-кислородной кривой.

4. Периодические изменения климата подчиняют изотопную летопись Каспия глобальному климатическому сигналу. Периоды относительной стабилизации климата позволяют выйти на передний план локальным (внутренним) механизмам – изменению составляющих водного баланса, определяющим изотопно-кислородный состав каспийских вод.

**Степень достоверности.** Лаборатории, осуществлявшие измерения стабильных изотопов, являются аккредитированными лидирующими мировыми организациями, специализированными на анализе четвертичных карбонатных материалов. Проверка достоверности полученных результатов осуществлялась путем повторных измерений образцов, а высокая степень достоверности выводов обеспечена обширным фактическим материалом и консультациями с ведущими специалистами в соответствующих областях знаний. Обращение к эталонным изотопно-кислородным кривым позволяет проследить степень обусловленности хода обобщенной изотопно-кислородной кривой Каспия климатическими изменениями. Сравнение с региональными природными архивами убеждает в надежности палеоклиматической реконструкции. Высокая степень сходимости микрофаунистических и изотопно-кислородных результатов автора с данными, полученными с помощью других методов, как по аналогичным материалам, так и по другим участкам Каспия, подтверждает релевантность интерпретации палеогеографических событий.

**Апробация работы.** Результаты исследования и основные положения диссертации представлены автором на российских и международных научных форумах: Международная конференция PRIDE-RCMNS (Тбилиси 2018), Международные конференции INQUA ROCAS (Анталья, 2018; Тегеран, 2019), Международный конгресс INQUA (Дублин, 2019), Всероссийская конференция с международным участием «Марковские чтения» (Москва, 2020), Международный симпозиум The Palaeontological Association Annual Meeting (Оксфорд, 2020), Всероссийская конференция ЭКЗОЛИТ (Москва, 2021, 2022), Всероссийская конференция «Проблемы палеоэкологии и исторической геоэкологии» (Тольятти, 2021), Международная конференция Annual Meeting of the Geological Society of America (Портленд, 2021), Всероссийская конференция с международным участием «Пути эволюционной географии», посвященная 90-летию А.А. Величко (Москва, 2021), XXIV Международная научная конференция (Школа) по морской геологии (Москва, 2022), Международная конференция PAGES (Агадир, 2022), Международная конференция The 5th International

Conference "Paleolimnology of Northern Eurasia" (Санкт-Петербург, 2022), Международная конференция IAL IPA (Сан-Карлос-де-Барилоче, 2022).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 44 научные работы, из них 5 статей в рецензируемых изданиях (журналах) из списка Scopus, WoS и RSCI (3 статьи в зарубежных журналах), 29 статей в сборниках и материалах всероссийских и международных конференций и 8 тезисов докладов. Во всех работах вклад автора является определяющим. Постановка научных задач, проведение исследований, анализ и интерпретация полученных результатов, предоставление их в печать осуществлялось непосредственно соискателем. Также опубликована коллективная монография, один раздел которой подготовлен диссертантом.

**Структура и объем работы.** Помимо Введения и Заключения, диссертационная работа состоит из пяти глав, включающих 35 рисунков и 4 таблицы. Объем диссертации составляет 191 страницу, основной текст изложен на 143 страницах. В работе содержится 5 приложений. Список литературы включает 289 источников (в том числе 199 на иностранных языках).

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д.г.н. Т.А. Яниной за неоценимую организационную и научную помощь в работе и безграничную поддержку. Автор искренне благодарна к.б.н. М.А. Зениной и к.г.-м.н. А. Джавадовой за обеспечение фактическим материалом, обучение и помощь в проведении микрофаунистического анализа. Особая признательность диссертанта д.г.н. С.Д. Николаеву за помощь в освоении анализа стабильных изотопов кислорода, д.г.-м.н. В.М. Сорокину, к.г.-м.н. А.Ю. Мальцевой и иностранным коллегам за ценный методический опыт, обучение и возможность самостоятельного проведения изотопно-кислородного анализа. Автор выражает глубокую благодарность к.г.н. Е.Е. Талденковой и иностранным коллегам, к.г.-м.н. Т.А. Веливецкой, д.г.-м.н. С.А. Горбаренко и коллективу ДВГИ ДВО РАН за направление и помощь в организации и проведении лабораторных анализов. Автор безмерно благодарна всем исследователям, чьи работы позволили создать обобщение, представленное в диссертационной работе. Диссертант искренне благодарит д.г.н. Н.С. Болиховскую за помощь в анализе палинологических данных и ценные советы в работе над диссертацией. Автор выражает глубокую благодарность д.г.н., профессору А.В. Бредихину и д.г.н., профессору С.И. Болысову за конструктивную критику и ценные советы в работе над диссертацией; д.г.н. В.В. Мацковскому за помощь в составлении обобщенной изотопно-кислородной кривой; к.г.н. Р.Р. Макшаеву за совместные полевые исследования, ценный опыт и помощь в работе над диссертацией. Автор выражает особую признательность Н.Т. Ткачу, к.х.н. Л.П. Бердниковой, Е.В. Терещенко, Н.С. Сычеву, В.А. Блинчевскому и К.Т. Янбухтиной за всеобъемлющую поддержку, помощь и критику в работе над диссертацией, помощь в организации проведения лабораторных анализов. Диссертант благодарит коллективы кафедры геоморфологии и палеогеографии и НИЛ новейших отложений и палеогеографии плейстоцена за направление, творческую атмосферу, понимание, поддержку, конструктивную критику и ценные советы.

Диссертационная работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 20-35-90020.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Глава 1. Природные условия региона исследований

Каспий представляет собой закрытый внутриконтинентальный водоем озерного типа – крупнейший в мире, как по площади, так и по объему. По морфологическим и физико-географическим особенностям в его пределах выделяются три зоны: северная, средняя и южная. Глубина моря нарастает в том же порядке. В геоморфологическом

отношении [Леонтьев и др., 1977] выделяются: прибрежная отмель, включающая подводный береговой склон и внешнюю равнину прибрежной отмели; а также склоны и днища глубоководных котловин. Четвертичные отложения подразделены на бакинский, хазарский, хвалынский и новокаспийский ярусы. Северный и Средний Каспий расположены в пределах континентального умеренного климата, Южный Каспий – в зоне субтропического климата. Основными преобладающими направлениями ветров являются СЗ и ЮВ. Температурный режим вод, как и соленость, непостоянны, сезонным колебаниям подвержена толща воды до 350 м, глубже температура воды в среднем составляет +4.5°С. Мелководье летом прогревается до 25 – 26°С, зимой Северный Каспий частично замерзает. Средняя соленость глубоководной части моря 12.5 – 13‰, понижения солености связаны с близостью устьев крупных рек. Средние значения изотопно-кислородного состава придонных вод (здесь и далее  $\delta^{18}\text{O}_w$ ) Среднего и Южного Каспия – около -1.5‰. Общая картина течений представляет собой круговорот против часовой стрелки. Среднегодовое значение общего водного баланса определены как -9/2 [Каспийское море..., 1986]. Большая меридиональная протяженность наряду с величиной водоема, характером окружающего рельефа и наличием климатической зональности определяют разнообразие физико-географических условий Каспия.

## **Глава 2. Современные представления о палеогеографических событиях в Каспийском регионе в конце позднего плейстоцена и голоцене**

Палеогеографический анализ в диссертации сосредоточен на заключительной части последнего климатического макроцикла во временном интервале, включающем морскую изотопную стадию 3 (МИС 3, вторая половина) и МИС 2, а также на голоцене (МИС 1). Результаты современных палеогеографических исследований наряду с огромным объемом информации, накопленной за многие десятилетия изучения Каспийского региона [Федоров, 1957; Рычагов, 1977, 1997; Квасов, 1975; Свиточ, 1991; Маев, 1994; Свиточ, Янина, 1997; Безродных и др., 2015; Чепалыга, 2004; Янина, 2012; Макшаев, Ткач, 2023; Cheralyga et al., 2008, 2009; Yanina 2012, 2014, 2018; Krijgsman et al., 2019; Kurbanov et al., 2022 и др.], дают основания утверждать, что в рассматриваемом промежутке времени амплитуда колебаний уровня Каспия составляла десятки метров и была подчинена изменениям климата. В указанный интервал входят несколько глобальных климатических явлений, различных по величине и влиянию, включая ледниковый и межледниковый периоды и их отдельные стадии, а также фаз развития и функционирования самого Каспийского бассейна.

## **Глава 3. Методика и материалы исследования**

Основным методом воссоздания палеогеографической картины позднего плейстоцена и голоцена Каспия в работе является комплексный (сопряженный) палеогеографический анализ, являющийся как основой реконструкции, так и ее завершающей, обобщающей и подводящей итог стадией. Автором использованы методы, учитывающие факторы, на которые оказывали влияние изменения климата и по которым можно восстановить условия палеоКаспия. Микрофаунистический анализ остракод подразумевает изучение биологического фактора – всевозможных изменений, которым была подвержена фауна остракод, непосредственно под влиянием изменения условий среды. С ним тесно связан анализ стабильных изотопов кислорода, который позволяет изучить особенности развития водоемов и, кроме того, может быть реализован на материалах фауны остракод.

Остракоды являются мелкими ракообразными и занимают практически все известные водные местообитания на Земле, демонстрируя высокое разнообразие в морских, солоноватых и пресных водах. Панцирь, состоящий из двух обызвествленных

хитиновых створок, покрывает все тело и обладает высокой сохранностью. Взрослая особь имеет размер от 0.5 до 2 мм. В рамках диссертации микрофаунистический анализ остракод выступает и в качестве независимого, самодостаточного источника информации о природной среде Каспия, и как биостратиграфический инструмент для подкрепления выводов по анализу стабильных изотопов кислорода. Последний, в свою очередь, применяется с целью определения изотопного состава кислорода раковин остракод, который формируется в условиях непрерывного протекания реакции изотопного обмена с водами Каспия, в процессе которой происходит перераспределение изотопов между реагирующими веществами без изменения их концентраций. Остракоды линяют до девяти раз, прежде чем достигнут зрелости. Каждая линька сопровождается полной регенерацией раковины в течение короткого периода времени, тем самым их створки представляют собой «моментальный» снимок условий, при которых происходила секреция раковины.

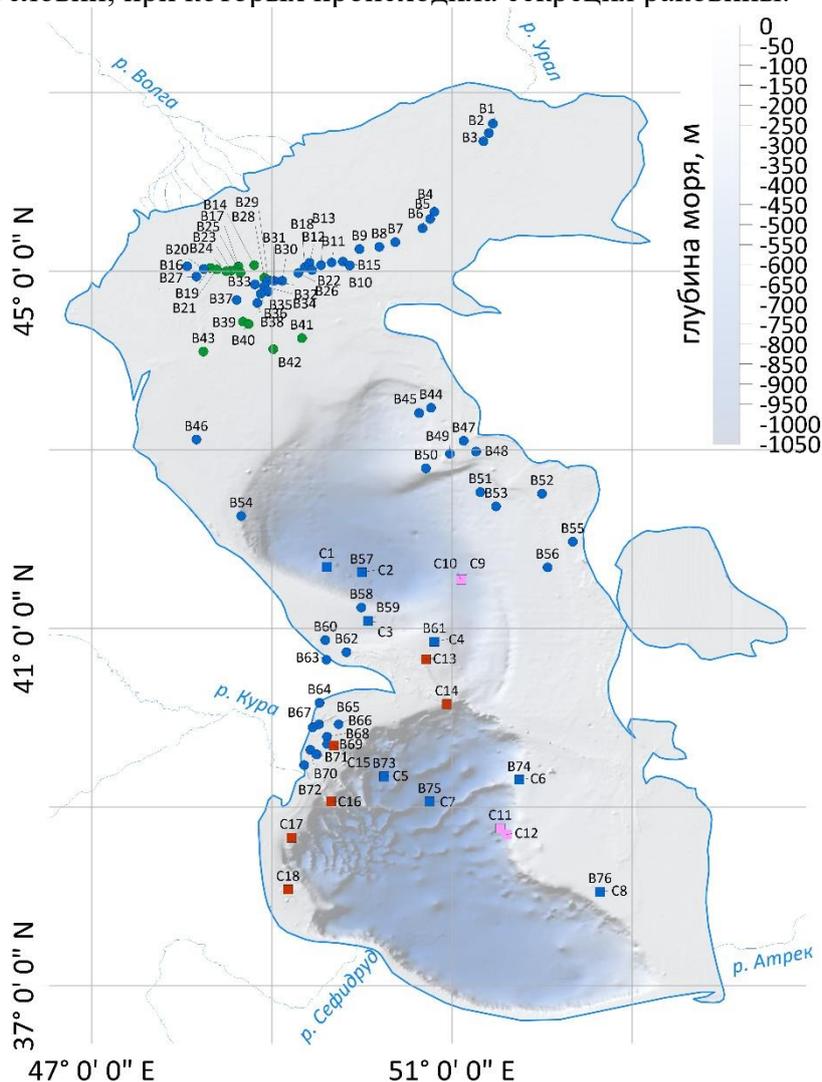


Рисунок 1. Местоположение изученных донных проб и материалов бурения. Поверхностные пробы: ● коллекция М.А. Зениной, ● коллекция Е.А. Гофман. Колонки: ■ коллекция Е.А. Гофман, ■ коллекция А. Джавадовой, ■ литературные данные.

Работа построена на изучении материалов трех палеонтологических коллекций, содержащих раковины и створки остракод (Рисунок 1). Коллекция Е.А. Гофман является результатом работ, посвященных изучению экологии остракод и фораминифер Каспия. Изменение тематики работ не позволило Е.А. Гофман выполнить исследования

Измерение изотопно-кислородного состава остракод (здесь и далее  $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ ) из донных проб северокаспийского сектора проводилось в Центре исследований океана GEOMAR (Helmholtz Centre for Ocean Research, Kiel, Germany) на масс-спектрометре Thermo Scientific MAT 253. Остальные измерения (основная часть проб) проводились в Приморском центре локального элементного и изотопного анализа ДВГИ ДВО РАН (Владивосток) на масс-спектрометре Finnigan MAT 252 (ThermoFinnigan, Bremen, Germany). Всего изотопно-кислородный состав раковин остракод ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ ) измерен в 258 образцах, среди них 105 донных образцов и 153 образца из колонок, многие измерения дублировались, некоторые измерялись трижды.

в полном объеме: «... из-за недостатка времени нам не удалось остановиться на анализе палеогеографических условий ..., основываясь на полученных данных по эколого-морфологическим признакам остракод.» [Гофман, 1964, стр. 5]. Работа с уникальным материалом не была завершена, осталась коллекция, нуждающаяся в дополнительной проработке. Диссертант осуществила или дополнила микрофаунистическое описание исследованных ею скважин, уточнила ряд морфологических признаков строения раковин и впервые применила анализ стабильных изотопов к образцам коллекции, реализовав палеогеографический аспект исследования и внося существенный вклад в работу над коллекцией. Основой работы является именно коллекция Е.А. Гофман, охватывающая донные пробы по всей акватории Каспия, а также материалы бурения его глубоководных районов.

Палеонтологическая коллекция А. Джавадовой передана лично автору работы для диссертационного исследования. В нее вошла микрофауна из материалов бурения Азербайджанского сектора Каспийского моря – Бакинского и Апшеронского участков, а также скважина в Иранском секторе Каспийского моря. В диссертацию включен только микрофаунистический анализ коллекции, так как, с точки зрения изучения стабильных изотопов, материал слишком разрознен и усреднен (скважины пробурены с целью поиска полезных ископаемых, пробы отобраны из крупных интервалов и с широким шагом). В работе результаты, полученные по коллекции А. Джавадовой, использованы в качестве вспомогательного материала.

Палеонтологическая коллекция М.А. Зениной также передана лично автору для диссертационного исследования и совместной научной работы. Она охватывает только донные пробы из Северного Каспия и используется в соответствующих разделах диссертационной работы.

В представленной работе широко используется литературный материал, связанный с темой диссертационного исследования [Chalié et al., 1997; Escudie et al., 1998; Jelinowska et al., 1998, 1999; Ферронский и др., 1994; Куприн и др., 2003; Boomer et al., 2005; Pierret et al., 2012; Leroy et al., 2013; Tudryn et al., 2014]. По этой причине дополнительные данные из публикаций, использованные диссертантом при построении обобщенной изотопно-кислородной кривой, также включены в эту главу.

#### **Глава 4. Микрофаунистический состав остракод и их стабильные изотопы из донных проб Каспийского моря**

Изучение изотопно-кислородного состава современных каспийских остракод, впервые реализованное в рамках диссертации, необходимо для успешного применения анализа стабильных изотопов кислорода при палеореконструкциях в Каспийском регионе, основанных на микрофауне.

Перед рассмотрением непосредственно результатов измерения изотопно-кислородного состава остракод установлен характер взаимосвязи между  $\delta^{18}\text{O}_w$  и основными гидрологическими показателями воды, в которой остракоды формируют свои раковины, а именно между  $\delta^{18}\text{O}_w$ , температурой (Т) и соленостью (S). Для этого изученные донные пробы были условно подразделены на несколько групп. В основе подразделения лежал общегеографический фактор, учитывающий Т – S условия, глубину моря, придонные течения, близость к берегу и местам впадения крупных рек. Помимо того, что в общем случае  $\delta^{18}\text{O}_w$  непрерывно меняется под воздействием испарения и конденсации, регрессионный анализ изученных параметров демонстрирует существование тесной связи  $\delta^{18}\text{O}_w$  с Т и S, которая особенно велика для центральных зон Южного и – в меньшей степени – Среднего Каспия. Утяжеление  $\delta^{18}\text{O}_w$  происходит с уменьшением Т, которая, в свою очередь, уменьшается с глубиной, коэффициент корреляции этих показателей очень высок (-0.76). В распределение солености

определяющий вклад вносит наличие речного стока – в море с относительно тяжелым изотопным составом впадают мощные поверхностные водотоки с резко отличающейся в меньшую сторону концентрацией тяжелого изотопа. Таким образом, определяющее влияние на изотопный состав воды оказывает глубина моря и удаленность от источника пресной воды. Дополнительный вклад вносит сезонность изменения T и S.

Микрофаунистический состав Каспийского моря весьма эндемичен, а относительно систематики каспийских остракод в настоящее время нет единства мнений. Два фактора затрудняют палеогеографическую интерпретацию результатов изучения каспийских остракод: 1) многие виды географически ограничены современным Понто-Каспийским регионом; 2) существует нехватка подробных исследований живых таксонов и исчерпывающих данных о среде их обитания. Данная глава призвана внести вклад в разработку этой проблемы, а также дополнить сведения об условиях обитания различных видов каспийских остракод. Анализ многочисленных проб позволяет выявить изменения в составе комплексов остракод по мере удаления от берега с возрастанием глубин – рассмотрены распространение и экология исследованных остракод на мелководье, на шельфе и материковом склоне и на дне глубоководных впадин.

Створки и раковины остракод часто содержат загрязняющие элементы, наличие которых может внести ошибку в изотопные измерения. Для Каспийского региона общепринятая методика подготовки образцов перед проведением изотопно-кислородного анализа не установлена, а погрешности, возникающие в результате химической обработки, до конца не изучены. Поэтому в диссертации особое внимание уделено рассмотрению различных способов (техник) пробоподготовки остракод для изотопно-кислородного анализа и выбору наиболее оптимального из них. Эта задача реализована на современных образцах каспийских остракод. Установлено, что помимо физического очищения налипшего на створки и раковины материала, никакой предварительной обработки для остракод в хорошем состоянии сохранности не требуется. Работа по такой системе имеет значительные преимущества: исключается потеря проб и повторное загрязнение на этапе подготовки; снижается рабочая нагрузка и значительно упрощается обработка проб. Различия полученных результатов при разных способах пробоподготовки оказались несущественными – для  $\delta^{18}\text{O}$  около 0.2%. Наибольшее отклонение обнаружено для техники предварительного замачивания в перексиде водорода без последующей промывки дистиллированной водой.

Хотя остракоды образуют свои раковины в целом с соблюдением условий изотопного равновесия, они, как и другие организмы, имеют разную продолжительность жизни, их активность отличается по сезонам года, во время которых происходит смена условий окружающей их среды. На фоне таких изменений установить соответствие изотопного состава раковины равновесным значениям бывает затруднительно. Даже такие классические объекты анализа стабильных изотопов, как моллюски и фораминиферы, несут следы метаболических эффектов – эффектов, связанных с жизненным циклом организмов. Именно они (так называемые «vital effects») являются одним из важнейших факторов, определяющих  $\delta^{18}\text{O}$  в морских карбонатах. Благодаря измерению стабильных изотопов в современных донных пробах, реализован крайне важный аспект работы – дана оценка видоспецифичного изотопного смещения шести наиболее часто встречающихся в пробах видов остракод: *Euxinocythere virgata* и *Tyrrhenocythere amnicola donetziensis*, живущих на мелководье; и более глубоководных видов – *Candona shweieri*, *Paracyprideis* sp., *Bacunella dorsoarcuata* и *Camptocypria* sp. Результаты подтвердили, что изученные остракоды несут следы метаболических эффектов – положительное смещение составляет около 1%. Это хорошо согласуется с данными, установленными другими исследователями, которые в

среднем варьируются от +2‰ до +0.5‰. Для *B. dorsoarcuata*, изотопное смещение которой составляет в среднем +1.77‰, стандартное отклонение составило всего 0.22‰. Наибольшее утяжеление изотопного состава в связи с жизненными эффектами зарегистрировано для *C. shweieri* (+2.81‰), однако стандартное отклонение для вида составило всего 0.57‰. Для *Camptocypria* sp. зарегистрировано высокое изотопное смещение (+2.73‰), степень отклонения также выше и составляет 0.95‰. Аналогичная картина наблюдается и для *Paracyprideis* sp., несмотря на относительно невысокое смещение (+1.55‰), разброс значений велик (стандартное отклонение достигает 1.12‰ – выше оно только для *T. amnicola donetziensis* (1.14‰)). Одним из важнейших наблюдений стало изотопное смещение по смешанному комплексу остракод, которое оказалось эквивалентно среднему изотопному смещению, рассчитанному по среднегодовым и зимним температурам воды Каспия, и составляет +1‰ ( $\pm 0.5$ ). Для сравнения, этот показатель составляет -2.25‰ в раковинах моллюсков *Cardium edule* и *Didacna trigonoides* и -3.27‰ в карбонатных илах [Ферронский и др., 1999] Каспийского моря.

Более высокая гидрологическая изменчивость на малых глубинах вызывает более заметные отклонения значений  $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$  от равновесия, изотопно-кислородный состав остракод на мелководье подвержен большему изменению, что было доказано на примере изучения мелководных видов *E. virgata* и *T. amnicola donetziensis*, величина изотопного смещения которых характеризуется отрицательными значениями (-0.11‰ и -0.25‰, соответственно). Наибольшее стандартное отклонение метаболических эффектов также зарегистрировано для *T. amnicola donetziensis* (1.14‰), довольно велико оно и для *E. virgata*. (0.7‰). При исключении из рассмотрения образцов, отобранных из зоны мелководья, для *B. dorsoarcuata*, *Paracyprideis* sp. и комплекса смешанных видов остракод показатель изотопного смещения не изменяется. Для *C. shweieri* изотопное смещение оказывается чуть больше (+2.94‰), однако стандартное отклонение для вида составляет всего 0.16‰, что существенно ниже такового по полной выборке. Для *Camptocypria* sp. зарегистрированное изотопное смещение снижается до +2.45‰, в то время как разброс значений сохраняется приблизительно на том же уровне – чуть меньше 1‰.

Не все вариации значений  $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$  могут быть объяснены жизненными эффектами. Оценка влияния физико-географических факторов на состав стабильных изотопов кислорода в раковинах остракод позволяет заключить, что в целом изотопный состав остракод определяет принадлежность к определенному типу водных масс. Изменчивость изотопно-кислородного состава остракод на мелководье объясняется высокоамплитудным перепадом температуры в течение года, между тем как на глубине почти круглый год сохраняются гомотермические условия, и такие контрасты оказываются сглажены. Кроме того, в целом остракоды, живущие на больших глубинах, демонстрируют смещения в сторону утяжеления изотопного состава. Утяжеление  $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$  при уменьшении температур связано с увеличением глубины моря, поскольку температура воды уменьшается с глубиной. На данный момент в Каспийском море на одних и тех же глубинах сохраняются одинаковые температурные условия, вследствие чего нет возможности сравнить измерения изотопно-кислородного состава раковин, сформировавшихся на одних и тех же глубинах, но при разных температурных условиях. Только такая работа позволила бы выявить истинный температурный сигнал. Наиболее очевидна линейная связь  $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$  со среднегодовой соленостью придонного слоя воды – изотопно-кислородный состав остракод в целом выше у тех экземпляров, которые формировали свою раковину в более соленой воде. Вероятно, таксономическая принадлежность остракод в данном случае не играет существенной роли.

Установленные закономерности позволили дать оценку возможности

палеотемпературных реконструкций. Для этого использованы четыре основных вида остракод (*C. shweiry*, *B. dorsoarcuata*, *Camptocypria* sp. и *Paracyprideis* sp.) и образцы, состоящие из смеси видов. Чтобы проверить, насколько правдоподобно можно предсказать температуру воды, в которой происходило формирование раковины, использовано уравнение палеотемпературы [Epstein et al., 1951, 1953; модифицированное Craig, 1965], решенное с использованием измеренных значений  $\delta^{18}\text{O}_w$  и значений  $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$  с поправкой на жизненные эффекты для образцов, отобранных с глубины моря больше 50 м. Прогнозируемая температура усреднялась по виду. По всей выборке в среднем вычисленная температура превышала фактически измеренную всего на 0.45 °C. Можно утверждать, что предсказанные температуры соответствуют фактическим в точках отбора проб, а изотопный состав кислорода изученных видов может быть достоверным индикатором температуры воды времени, соответствующего времени кальцификации раковины. Важно оговорить, что палеотемпературное уравнение и его вариации применимы для водоема в стационарном состоянии. Это связано с тем, что  $\delta^{18}\text{O}_w$  не остается постоянным во времени, а неопределенность изотопного состава воды прошлого является главной проблемой изотопной палеотермометрии. Этот эффект еще более сильно выражен в закрытых водоемах, каковым является Каспийское море. Изученный в современных пробах эффект изотопного смещения в раковинах остракод и известная температура в точках отбора проб позволяют оценить связь  $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$  и  $\delta^{18}\text{O}_w$ , однако она будет выполняться лишь до смены внешних факторов. То есть в контексте изменений, которые Каспий претерпевал на протяжении своей истории (в частности, в позднеледниковье, которому посвящена значительная часть диссертации), подобные попытки расчета палеотемператур могут дать ложные результаты.

### **Глава 5. Биохроностратиграфия и палеоэкология материалов глубоководного бурения Каспия как инструменты создания обобщенной изотопно-кислородной кривой**

Для получения единой, непротиворечивой палеогеографической картины в целях создания первой обобщенной изотопно-кислородной кривой Каспийского моря результаты, полученные в диссертационном исследовании, проанализированы в совокупности с данными других исследователей Каспийского региона по колонкам из Среднего и Южного Каспия. Рассмотрены вопросы построения возрастных моделей, поиска стратиграфических границ, корреляции отложений и интерпретации палеоклиматических событий.

Основной принцип построения обобщенной изотопно-кислородной кривой заключается в разделении летописи прошлого на последовательные эпизоды, чтобы обеспечить удобное и однозначное их отнесение к конкретным временным интервалам, устанавливая при этом очередность и наименование палеоклиматических событий, выделяемых для всей Северной Евразии. Каждому из таких событий, как правило, соответствует определенная фаза (эпоха) или состояние Каспийского моря – трансгрессия или регрессия. Однако помимо событий выделяются также переходные стадии – временное состояние или транзит от одного события к другому, который временами является спусковым механизмом, или триггером, начала соответствующей фазы трансгрессивно-регрессивного цикла. Надежно датированный интервал обобщенной изотопно-кислородной кривой (Рисунок 2) охватывает последний ледниковый максимум (Last Glacial Maximum, LGM, ПЛМ), позднеледниковье и голоцен. Позднеледниковье (или период дегляциации) представляет собой переход от ПЛМ к голоцену, который характеризуется повышением температуры, быстрым таянием ледников, резким повышением уровня моря и включает в себя несколько

климатических колебаний более низкого ранга [Alley et al., 1993] – потепления бёллинг (Bølling, B) и аллерёд (Allerød, A), а также серию похолоданий, наиболее выраженное из которых получило название поздний дриас (Younger Dryas, YD, 12.9 – 11.7 тыс. кал. л.н.) [Rasmussen et al., 2006; Lowe et al., 2008]. С точки зрения изменения уровня Каспийского моря указанный промежуток времени вмещает несколько стадий трансгрессивно-регрессивного цикла.

Любые подразделения изотопно-кислородной кривой должны, в первую очередь, отражать изменения климатической динамики, лежащей в их основе для того, чтобы обеспечивать понимание функционирования и развития всей природной системы. В то же время выделение событий должно быть совместимо с существующей номенклатурой и региональной стратиграфией, оставаясь достаточно гибким для обеспечения возможности дальнейшего уточнения схемы палеогеографических событий по мере получения новых данных. Этот аспект особенно важен в контексте данной работы, поскольку создание обобщенной изотопно-кислородной кривой для Каспийского моря осуществляется впервые и охватывает лишь конец позднего плейстоцена и голоцен.

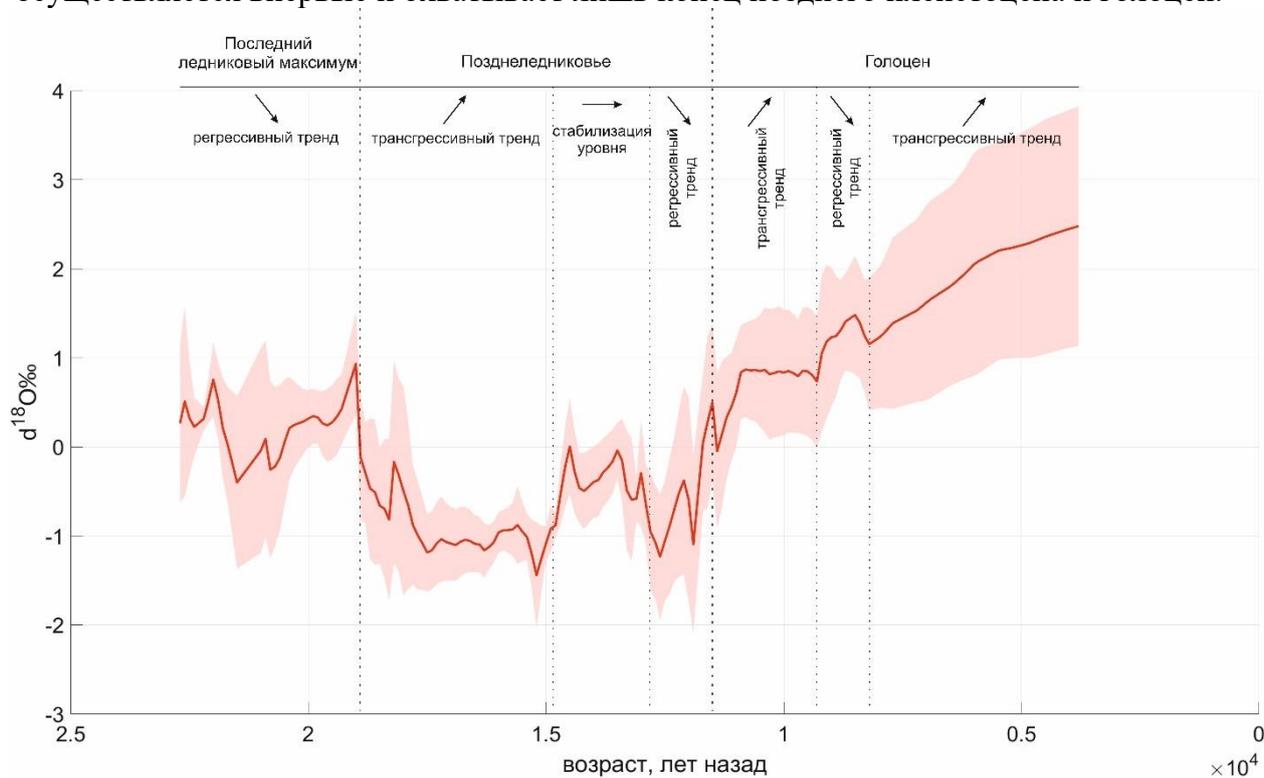


Рисунок 2. Обобщенная изотопно-кислородная кривая Каспийского моря, построенная по 9 кернам из Среднего и Южного Каспия и литературным данным (3 кривых). Возраст указан в  $\times 10^4$  лет назад.

Обращение к изотопно-кислородным кривым изученных материалов бурения позволяет проследить, насколько их ход продиктован климатическими изменениями. Выделены следующие этапы развития Каспийского моря:

1. *Последний ледниковый максимум (МИС 2, LGM, ПЛМ)*. Нижний горизонт осадков, вскрытых колонками, характеризуется в целом утяжеленными изотопно-кислородными показателями. Данные отложения накапливались в ледниковое время с сухим и холодным климатом [Röhringer et al., 2012], препятствующим химическому преобразованию на водосборе, и соотносятся со временем ПЛМ (по наиболее низкому уровню моря 22 – 19 тыс. кал. л.н. [Yokoyama et al., 2000]; по уровню моря и объему льда на планете 26–19 тыс. кал. л.н. [Clark et al., 2009, 2012]; в строгом определении 23 – 19 тыс. кал. л.н. [Mix et al., 2001] (уровень 1 хронозоны) в пределах МИС 2), для которого реконструируются низкие значения летней инсоляции в Северном полушарии [Berger, 1988] и широкое развитие ледников [Peltier, 1994]. Максимальные значения

$\delta^{18}\text{O}$  в большинстве региональных изотопных кривых приходятся на конец ПЛМ (18.5 – 19.5 тыс. кал. л.н. [Stern, Lisiecki, 2014]). В Каспийском море непродолжительный регрессивный этап реконструирован [Макшаев, Ткач, 2023] для близкого временного промежутка (около 18 – 17 тыс. л.н.) Для построения обобщенной кривой пик изотопного утяжеления принят за 19 тыс. кал. л.н.

Регрессия Каспийского моря в данный период реконструировалась многими исследователями [Янина, 2012; Yanina, 2014; Yanina et al., 2018; Krijgsman et al., 2019 и др.], однако изученные колонки не позволяют оценить события, предшествовавшие ПЛМ. Относительное утяжеление изотопного состава объясняется аккумуляцией более легких изотопов кислорода в ледниковых образованиях, а также пониженным стоком в Каспийское море и общей сухостью климата. Этот вывод подтверждается в работе [Svendsen et al., 2004], согласно которой Скандинавский ледник во время последнего периода оледенения мог функционировать как ловушка атмосферных осадков, в результате чего меньшее количество влаги переносилось западными ветрами. На Памире и Тянь-Шане масштаб оледенения в МИС 2 был существенно меньше, чем в более древние периоды. Считается, что это связано со сдвигом к югу сибирского антициклона, блокирующего влажные западные воздушные массы и аналогичным образом вызывающего засухи в Центральной Азии [Aizen et al., 2006]. Большое количество переотложенной пыльцы в колонке из Среднего Каспия [Leroy et al., 2014], присутствие дочетвертичных таксонов и низкие концентрации пыльцы и спор также можно считать маркером сухих, прохладных условий [Н.С. Болиховская, личное сообщение]. Еще П.В. Федоров [1957], приводя доводы в пользу климатической природы изменения уровня Каспийского моря, писал о том, что трансгрессии сопровождалась относительным опреснением водных масс, а регрессии – их осолонением. Действительно, отклонение изотопно-кислородной кривой в сторону более высоких значений, может быть результатом изотопного утяжеления вследствие более высокой солености водоема. К сожалению, временной охват изотопно-кислородной кривой ограничен последним ледниковым максимумом, однако в целом полученные данные не позволяют предположить глубокую регрессию моря в это время.

2. *Позднеледниковье.* Среди общих для всех изученных материалов характеристик осадков последующего периода выделяются более легкий в изотопном отношении состав, низкие соленость и скорости придонных течений, которые начинают возрастать при приближении к вышележащему горизонту на фоне высоких скоростей осадконакопления. Согласно кривой (Рисунок 2), данный этап приходится на период дегляциации. Автор соотносит его с хвалынской трансгрессией. Низкая соленость – как правило, не более 7‰, реконструируется по микрофауне остракод. Подобные значения подтверждаются анализом диноцист [Leroy et al., 2013], фораминифер [Янко, 1989] и малакофауны [Янина, 2012]. Питание моря осуществлялось, главным образом, за счет изотопно более легких – речных и атмосферных – вод. Глубоководные осадки, соответствующие данному периоду, зачастую характеризуются содержанием сульфидов железа диагенетического происхождения, ассоциированных с ухудшением глубоководной вентиляции в ответ на пониженную соленость вод. В.С. Брезгунов [2019] показал, что в период трансгрессии глубоководная вентиляция меняется так, что создаются бескислородные или близкие к таковым условия. Приток поверхностных вод способствует не только сохранению невысокой температуры воды моря на фоне прохладного климата, но и опреснению водных масс, что, в свою очередь, приводит к облегчению изотопного состава карбонатов. Высокий уровень Каспийского моря подтверждается результатами изучения диноцист [Leroy et al., 2013] наряду с пониженной температурой воды. Прохладный и влажный климат, сохранявшийся над акваторией и водосбором Каспия и нашедший отражение в пониженных значениях

карбонатности осадков и общего содержания органического вещества, способствовал пониженному испарению. Гумидизация климата подтверждается и данными спорово-пыльцевого анализа. Отсутствие резких контрастов в сезонном поступлении взвешенных частиц, характере стока, температуре и плотности потоков для отдаленных дистальных озер, не имеющих непосредственного контакта с ледником, зачастую способствует формированию довольно однородных осадков алевроитово-глинистого состава [Ashley et al. 1985]. Таким образом, состав отложений также является наследием позднеледникового времени.

Согласно данным Рисунка 2, трансгрессия развивается поступательно. Приблизительно с 18 тыс. л.н. Каспий входит в полноценную трансгрессивную фазу, изотопно-кислородные значения постепенно снижаются до наиболее легких отметок, причем максимум данной трансгрессивной фазы (охваченной кривой) приходится приблизительно на 15.5 тыс. л.н., то есть соответствует времени хвалынской трансгрессии. Это хорошо согласуется с данными [Stern, Lisiecki, 2014], согласно которым наиболее низкие значения  $\delta^{18}\text{O}$  карбонатов достигаются спустя 500–2500 лет с начала подъема уровня. Согласно мнению многих исследователей [Янина, 2012; Свиточ, 2014 и др.], Каспийское море достигло максимальных отметок уровня (до +50 м) в фазу, следующую именно за деградацией поздневалдайского ледника, однако точный возраст этого события до настоящего времени неизвестен [Yanina et al., 2018]. Также исследователи [Макшаев, 2019] реконструируют уровень бассейна не ниже +30 м абс. около 17 тыс. л.н.

На Памире в долине р. Муксу времени активизации хвалынской трансгрессии (около 17 тыс. л.н.) соответствует последний этап отступления ледника [Grin et al., 2016]. Согласно последним данным [Kurbanov et al., 2022; Taratunina et al., 2022], накопление хвалынских шоколадных глин также началось порядка 18–17 тыс. л.н. Приблизительно к 16 тыс. л.н. [Макшаев, 2019] (возможно, раньше [Gorlach et al., 2017]) северо-западная часть волжского бассейна полностью освободилась от поздневалдайского ледникового покрова, и обильное поступление талых вод в Каспий прекратилось. Повышение уровня Каспийского моря после ПЛМ хорошо объясняется климатически обусловленным увеличением речного стока, реконструируемым [Sidorchuk et al., 2009; Panin, Matlakhova, 2015] в интервале 18 – 13 тыс. л.н. В.И. Ферронский с коллегами [1999] предположили, что понижение солености (до 7‰), связанное с притоком пресных вод, должно было соответствовать уровню моря на 70 м выше текущей отметки.

Интересно также отметить, что начало рассматриваемой фазы хвалынской трансгрессии предваряет существенная интенсификация южноазиатского муссона (в период от 19.9 до 17.1 тыс. л.н.), на которую указывают более отрицательные значения  $\delta^{18}\text{O}$  в спелеотемах пещеры Хулу [Wu et al., 2009]. Общий механизм, лежащий в основе тысячелетней изменчивости климата Северного полушария, также подтверждается тем, что максимальное изотопное облегчение совпадает с H1 (событием Хайнриха 1, Heinrich event 1) [Heinrich, 1988], возраст которого определяется 14 кал. тыс. л.н. [Vidal et al., 1999] – 16.8 кал. тыс. л.н. [Hemming, 2004 по Bond et al., 1992], хотя, разумеется, выделять события Хайнриха, как и другие циклы тысячелетней изменчивости климата, непосредственно в Каспийском море оснований нет.

Наглядно заметен пульсационный характер данной фазы хвалынской трансгрессии – наиболее высокому уровню стояния моря предшествуют чуть менее легкие значения кривой, разделенные изотопно тяжелым пиком. На смену максимуму развития трансгрессии приходит понижение уровня Каспийского моря: некоторое время уровень мог гистерезисно поддерживаться, но в конечном счете сокращение приходной составляющей водного баланса выразилось в его снижении. Принимая во внимание общий характер кривой (Рисунок 2), можно заключить, что трансгрессивный

тренд довольно резко прерывается сразу после максимума изотопного облегчения около 15 тыс. л.н. Кроме того, в ходе рассматриваемой хвалынской фазы развивался односторонний сток в новозвксинский бассейн через Манычский пролив, реконструированный [Семиколенных, 2022] (около 18 – 14 тыс. л.н.). Таким образом, можно предположить, что спуск хвалынского бассейна, представляющий собой расходную составляющую водного баланса, также способствовал понижению уровня Каспия. Очевидно, такой сброс воды мог развиваться и после прекращения активного поступления вод в Каспийский бассейн вплоть до достижения порога стока, после чего, согласно [Свиточ и др., 2008], уровень Каспия стабилизировался на отметках +20 +22 м абс. Для этого этапа получена большая часть хвалынских дат, возрастом около 14 тыс. кал. л.н. [Янина, 2012].

Хотя относительно теплый и влажный климат В – А является обобщением, по-видимому, он сохранялся в течение периода 14.7 – 12.9 тыс. л.н. Изотопно-кислородная кривая Каспия в это время демонстрирует хорошо различимые пики утяжеления состава. Характерно, что события смещения кривой  $\delta^{18}\text{O}$  в сторону утяжеления, сопоставляемые с потеплениями бёллинг и аллерёд, разделены более прохладным событием около 14 тыс. л.н. Согласно [Макшаев, 2019], в это время происходит стабилизация уровня Каспия.

Вслед за потеплением климата уровень хвалынского моря несколько понижается. Вероятно, важную роль в водном балансе водоема приобретает испарение над акваторией, а также увеличение солености, которые на фоне общего повышения температуры приводят к росту значений  $\delta^{18}\text{O}$ . Состав остракод меняется, виды, предпочитающие большие глубины и холодную воду, постепенно вытесняются более мелководными. Общая численность остракод снижается, что согласуется с наблюдениями других исследователей [Boomer et al., 2005]. Во многих колонках отмечается рост содержания *C. torosa*, что свидетельствует о смене условий водной среды, в которой выживают наиболее устойчивые к изменениям виды [Smith, Horne, 2002]. По спорово-пыльцевым данным отмечается увеличение роли кустарников [Leroou et al., 2013]. Рост солености (до 12 – 15‰) и карбонатности осадков изученных колонок также позволяет предположить потепление климата в период их накопления и сопоставить его с интерстадиальным потеплением. В волжском эстуарии и в Нижнем Поволжье в это время отмечается интенсивное накопление массивных шоколадных глин. Период потеплений сопоставляется [Макшаев, 2019] с увеличением стока в волжском бассейне, однако полученные автором диссертационной работы данные не позволяют выделить существенный приток пресной воды в Каспий. Возможно, это событие было значимым в северокаспийском регионе, но не нашло отражения в изученных осадках глубоководной части моря. В целом данный период соотносится автором с хвалынской трансгрессивной эпохой, хотя наметившийся регрессивный тренд становится все более очевиден.

Во время похолодания позднего дриаса (YD), для которого также реконструируется общее иссушение климата, площадь бассейна Каспийского моря продолжает постепенно сокращаться. По данным микрофауны предполагается, что YD явился одним из переходных этапов на пути формирования современного каспийского сообщества из более глубоководного и холодолюбивого хвалынского. Здесь также преобладают виды, предпочитающие меньшие глубины и в целом более толерантные к изменениям условий водной среды. Изученные материалы бурения свидетельствуют о климатических перестройках в регионе, но не позволяют выделить YD как отдельный этап трансгрессивно-регрессивной ритмики. Палинологические данные для данного промежутка времени свидетельствуют об аридизации климата.

Начиная с 12.3 тыс. л.н. волжский эстуарий и большая часть Нижнего Поволжья

освободилась от морских вод [Макшаев, 2019]. В разрезах Среднего и Нижнего Поволжья наблюдаются свидетельства промерзания верхнего горизонта шоколадных глин и признаки криогенного преобразования [Taratunina et al., 2022]. В этот период реконструировано последнее крупное расселение фауны моллюсков с преобладающими видами *Monodacna caspia* и *Dreissena polymorpha*. В то же время изотопно-кислородная кривая Каспия отклоняется (Рисунок 2) в сторону изотопно-легких значений. Характерный для YD двойной пик  $\delta^{18}\text{O}$  при этом достигает значений, сопоставимых с таковыми во время дегляциации. Широко известно, что результатом периодических изменений климата в сторону похолоданий и потеплений служило изменение изотопного состава атмосферных осадков, питающих внутренние водоемы и их водосборные бассейны. Эти изменения аналогичны проявлению широтного эффекта [Ферронский и др., 1999]. То есть с момента деградации последнего ледникового покрова Каспий в холодные эпохи питался более легкими по изотопному составу (речными и атмосферными) водами, чем в теплые. Вероятно, именно этим объясняется существенное изотопное облегчение вод Каспийского моря в позднем дриасе.

3. *Голоцен (МИС 1)*. Начало голоцена ознаменовалось резким взлетом изотопно-кислородной кривой в сторону положительных значений  $\delta^{18}\text{O}$ . Главным образом это связано с быстрым потеплением климата, нашедшим отражение в различных палеоархивах [Cuffey et al., 1995; Severinghaus et al., 1998]. Около 11.5 тыс. л.н. изотопно-кислородная кривая вновь отклоняется в сторону отрицательных значений, что, по мнению автора, связано с завершающим импульсом хвалынской трансгрессии на фоне прохладного и относительно более влажного климата пребореала, реконструируемого после YD в интервале 11.7 – 10.6 тыс. л.н. По палинологическим данным рассмотренных колонок отмечается увеличение содержания пыльцы древесных, в частности темнохвойных и широколиственных, компонентов, злаков, папоротников и сфагнумов и общая гумидизация климата. Этот вывод согласуется с данными Н.С. Болиховской [2011], согласно которым на территории Нижней Волги господствовали лесостепные ландшафты, широкое развитие получили темнохвойные леса. Более влажный климат способствовал интенсификации процессов химического выветривания на водосборе. Осадки изученных колонок принципиально отличаются от нижележащих по своим геохимическим признакам. Те же закономерности отмечаются [Куприн и др., 2003; Pierret et al., 2012; Kakroodi et al., 2015] для отложений раннего голоцена, которые четко отделяются от позднеплейстоценовых вследствие изменения материала, поступающего с площадей, дренируемых реками.

Начало голоцена также знаменуется максимальным обогащением карбонатами осадков в рассмотренных колонках. Изученная автором микрофауна остракод свидетельствует в пользу существования более теплого и менее глубокого водоема, однако существенных отличий от периода, соотнесенного с интерстадиальным потеплением, не несет. О том, что бассейн был более тепловодным и солоноватоводным, чем в максимальную фазу развития трансгрессии (в среднем 11 – 14‰), свидетельствуют данные многих исследователей [Абрамова, 1974; Яхимович и др., 1986; Янко, 1989; Янина, 2012]. Возможно, именно эта стадия соответствует традиционно выделяемой многими исследователями поздней хвалыни, околголоценовый возраст которой находит все больше подтверждений [Свиточ, Янина, 1997; Янина, 2012; Макшаев, Ткач, 2023]. Однако Рисунок 2 наглядно демонстрирует, что эта финальная стадия хвалынской эпохи была лишь небольшой осцилляцией уровня моря на фоне общего регрессивного тренда.

Сокращение площади Каспийского моря и понижение его уровня к 9.5 – 9 тыс. л.н. (Рисунок 2) ознаменовало его вступление в мангышлакскую регрессивную фазу. Осадки, вмещающие изученную микрофауну остракод, отлагались на меньших

глубинах, чем в настоящее время. Хотя данные  $\delta^{18}\text{O}$  не позволяют оценить величину падения уровня моря, можно проследить реакцию Каспия на возросшую континентальность климата в бореальное время. К этому времени приурочен один из пиков солености моря, которая в целом достигает наиболее высоких значений среди реконструируемых для глубоководных колонок. Повышенная соленость отмечается и по результатам изучения фораминифер [Янко, 1989] и диноцист [Leroy et al., 2013].

Исходя из Рисунка 2, максимальная стадия мангышлакской регрессии была достигнута к концу фазы и приурочена к так называемому событию 8200 (или 8.2k event). Как и более ранние палеоклиматические эпизоды, это похолодание проявилось во многих архивах, по крайней мере, Северного полушария [Daley et al., 2011; Cheng et al., 2012], снижением изотопно-кислородного состава и изотопно-легким пиком  $\delta^{18}\text{O}$ . Этот факт вновь подтверждает чувствительность Каспийского моря к пространственным климатическим сигналам – именно облегчением изотопного состава заканчивается мангышлакская регрессия и открывается новокаспийская трансгрессия на Рисунке 2. Согласно [Alley, Agustsdottir, 2005], в то время, как в Европе событие 8200 нашло отражение скорее в похолодании климата, особенно в зимнее время, в Средней Азии откликом явилось ослабление муссонной циркуляции, которому сопутствовали засухи. Сочетание этого комплекса факторов, по-видимому, привело к падению уровня Каспийского моря в начале голоцена.

Новокаспийская трансгрессивная эпоха пришла на смену мангышлакской регрессии около 8 тыс. л.н. Она развивалась на фоне теплого и влажного климата [Болиховская, 2011; Новенко, 2016] при приближении к климатическому оптимуму голоцена (8.2 – 5.6 тыс. л.н.), что позволило нарастить и сохранить трансгрессивный тренд. Так, оценки [Панин и др., 2005; Sidorchuk et al., 2009] допускают повышение уровня моря до -22 м, что хорошо соотносится с максимумом новокаспийской трансгрессии. Комплекс остракод становится идентичен современному каспийскому комплексу – преобладают виды-космополиты типичные для солоноватоводных условий (*Leptocytheridae* и *Loxosconchidae*) наряду с эндемиками Каспия (например, *Vacunella*). Начало голоцена в спорово-пыльцевых спектрах изученных глубоководных колонок регистрируется по появлению теплолюбивых деревьев [Leroy et al., 2013]. Необходимо отметить, что в процессе составления обобщенной кривой автор не сталкивалась с асинхронными изменениями  $\delta^{18}\text{O}$  в колонках Среднего и Южного Каспия, рассматриваемыми французской группой исследователей [Leroy et al., 2014] вслед за отечественными коллегами [Ферронский и др., 1999; Kuprin, Pirumova, 2002], поэтому рассматривать выдвинутое ими предположение об ограничении или полном отсутствии взаимосвязи между Средним и Южным Каспием в голоцене не было необходимости.

После поднятия уровень моря, вероятно, вновь понизился (во временном интервале 5.6 – 3.7 тыс. л.н. [Актуальные проблемы..., 2020]; 7.5 – 3.5 тыс. л.н. [Leroy et al., 2013]) в ответ на иссушение климата [Болиховская, 2011] и низкую флювиальную активность [Panin, Matlakhova, 2015]. Исследователи объясняют это наступлением так называемого климатического события 4200 (или 4.2k event) – периода иссушения климата [Staubwasser, Weiss, 2006; Schmidt et al., 2011], а также снижением водоснабжения Каспия из низких широт, в частности, через Амударью. Однако построенная изотопно-кислородная кривая не охватывает и, соответственно, не позволяет проследить данные изменения. Сложная внутренняя динамика новокаспийского времени описана многими исследователями региона [Федоров, 1957; Никифоров, 1960; Леонтьев, 1961; Маев, 1962; Рычагов, 1977, 1997 и др.], однако глубоководные участки моря, по-видимому, оказались нечувствительны к колебаниям его уровня. Обобщенная изотопно-кислородная кривая демонстрирует монотонное утяжеление значений на начальных стадиях новокаспийской трансгрессии, связанное с

потеплением климата при приближении к термическому оптимуму голоцена, а после – в связи нарастанием испарения над акваториями Среднего и Южного Каспия, поэтому более молодую последовательность палеогеографических событий автор характеризует как сложную смену повышения и понижения уровня моря.

Сравнительный анализ полученной кривой с региональными и глобальными палеоархивами позволяет убедиться в когерентности кривой (Рисунок 2) и тесной взаимосвязи Каспия с другими природными системами. Изотопная летопись Каспия в позднеледниковье несет явный отпечаток климатических изменений, общих для Северного полушария, – прослеживаемый климатический сигнал демонстрирует очевидное сходство с гренландскими изотопно-кислородными кривыми GRIP, GISP2 и NGRIP [Rasmussen et al., 2014], в то время как локальный сигнал оказывается сглажен за счет использования данных бурения глубоких участков моря. Этот факт доказывает оправданность традиционного рассмотрения палеогеографии Каспийского региона с точки зрения изменений климата Северной Евразии.

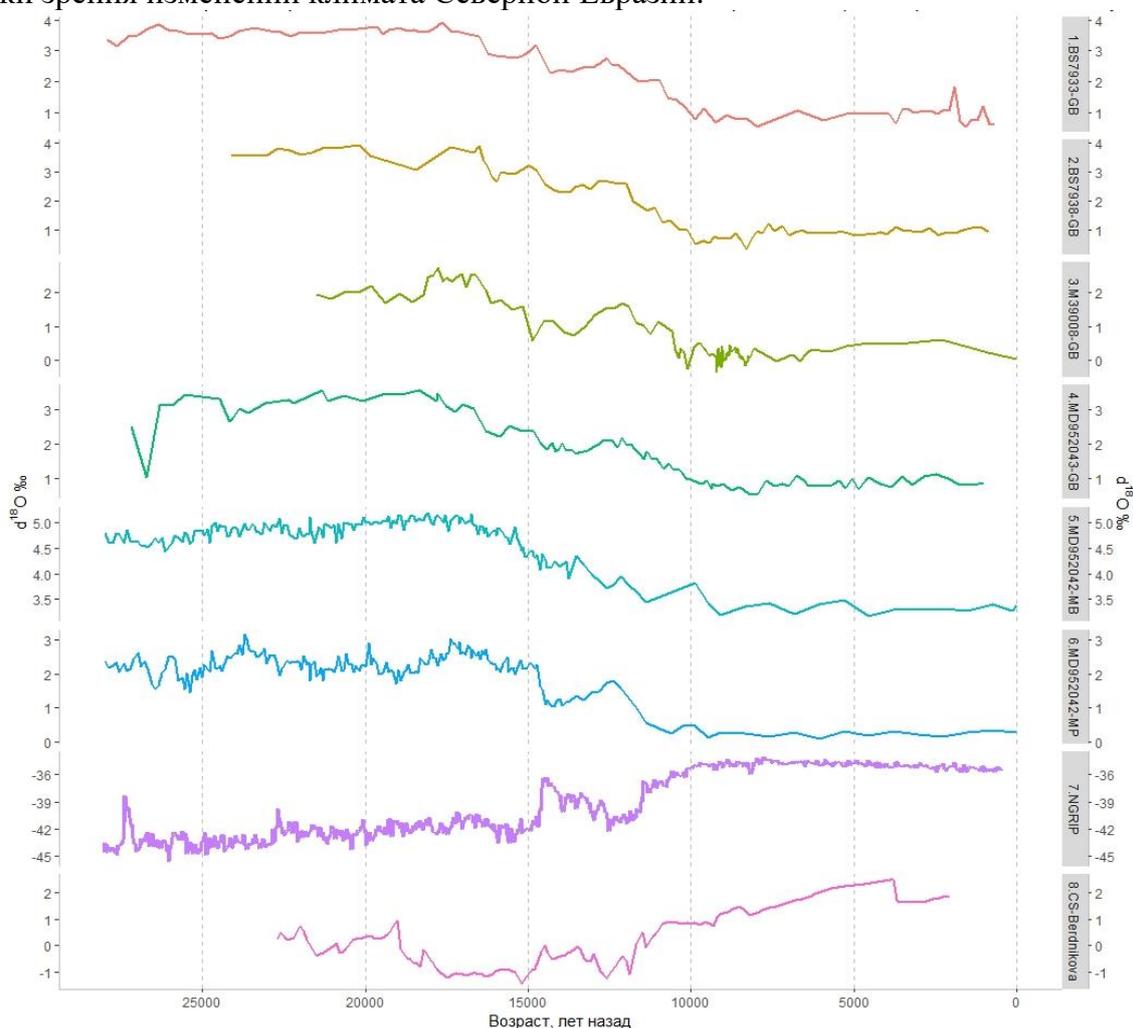


Рисунок 3. Изотопно-кислородные кривые: 1 – 4 западная часть Средиземного моря [Cacho et al., 2001]; 5 – 6 северо-восточная Атлантика [Shackleton et al., 2000]; 7 Гренландский ледниковый керн [North Greenland Ice Core Project Members, 2004; Rasmussen et al., 2014]; 8 Каспийское море [автор диссертационной работы].

Взаимосвязь моря с климатическими изменениями в Центральной и Средней Азии изучена хуже. Однако именно здесь, возможно, кроются причины повышения водности рек, несущих свои воды в Южную часть бассейна Каспия. Наиболее разработанной является гипотеза влияния летнего индийского или южноазиатского муссона на Памиро-Алайскую горную систему, откуда берет истоки Амударья [Hagg et al., 2007]. Степень этого влияния до сих пор остается дискуссионным вопросом.

Впервые связь между интенсивностью муссона и водностью рек Амударья и Зеравшан установлена в работе [Schiemann et al., 2007], она выражается в интенсификации таяния ледников во время устойчивого муссона и, соответственно, периода повышенной влажности [Owen, 2009], но не за счет его непосредственного продвижения на север, а в силу «согревающего» эффекта. Некоторые этапы усиления муссонов [Wang et al., 2001; Wu et al., 2009] совпадают с периодами повышенной водности Каспия (возрастной контроль натечных пещерных образований существенно выше, чем обобщенной кривой Каспия) – три периода сильных муссонов определяются в 19.9–17.1, 14.7–12.8 и 11.6–10.3 тыс. л.н., периоды слабых муссонов: 22.1–19.9, 17.1–14.7 и 12.8–11.6 тыс. л.н. Получается, объяснить изменениями муссонной циркуляции трансгрессивно-регрессивную ритмику Каспия нельзя, что, тем не менее, не нарушает логики палеогеографической интерпретации, поскольку если ледники Тибета и Гималаев были синхронны как вариациям климата вследствие изменчивости южноазиатского муссона, так и циклам похолодания в Северном полушарии [Owen et al., 2008], то ледники Памира, Тянь-Шаня и западных отрогов Тибетско-Гималайского орогена, вероятно, продвигались асинхронно по отношению к другим регионам Гималаев и, по-видимому, в основном находились в фазе с циклами охлаждения в Северном полушарии [Owen et al., 2012]. То есть в связи с тем, что климат Тянь-Шаня и Памира, откуда, в частности, берет начало Амударья, находится под влиянием западных ветров средних широт [Owen, 2009], изменение южноазиатских муссонов не должно было оказывать существенного влияния на динамику Каспийского моря.

Более детальный региональный сигнал можно проследить на графиках сопоставления изотопно-кислородных данных Каспия и расположенных в относительной географической близости к нему пещер и озер (Рисунки 4 – 5).

Период интерстадиального потепления GI – 1 отчетливо прослеживается лишь по данным из пещеры Тоннельная, на смену ему, как и в Каспийском море, приходит облегчение  $\delta^{18}\text{O}$ . Чуть менее заметно оно в турецкой пещере Софулар, где серия более высокоамплитудных колебаний изотопно-кислородного состава выделяется на фоне общего тренда к утяжелению. Остальные спелеотемы позволяют проследить только аналогичное Каспийскому изотопное утяжеление, начавшееся после YD и знаменующее собой голоцен. Особенные сходства хода кривой  $\delta^{18}\text{O}$  Каспийского моря наблюдаются с изотопными данными из озера Старый Ачиголь. В обоих палеоархивах прослеживается изотопное утяжеление в ПЛМ, за которым следует максимальный пик облегчения изотопного состава, а также двухфазное потепление GI – 1 (B – A), сменяющееся похолоданием позднего дриаса. При этом как характерный рост  $\delta^{18}\text{O}$  в начале голоцена, так и периодические колебания кривой, вероятно, связанные с изменениями уровня озера, более детально наблюдаются в Центральной Турции. Похожая динамика свойственна и для озера Ван – несмотря на то, что разные кривые фиксируют несколько отличную друг от друга амплитуду изменения изотопно-кислородного состава в ходе интерстадиального потепления (возможно, вследствие разной детальности отбора проб), общий ход кривых (Рисунок 5) повторяет Рисунок 2. Примечательно, что среди рассмотренных региональных объектов все спелеотемы фиксируют утяжеление изотопного состава, свидетельствующее о сухости климата, проявляющейся в Каспийском регионе, в первую очередь, ростом испарения. Среди озерных архивов такая тенденция наблюдается лишь в озере Иссык-Куль. Это подтверждает локальность климатического сигнала Каспия во второй половине голоцена и позволяет предположить перспективность изучения азиатских факторов в будущих исследованиях Каспийского моря.

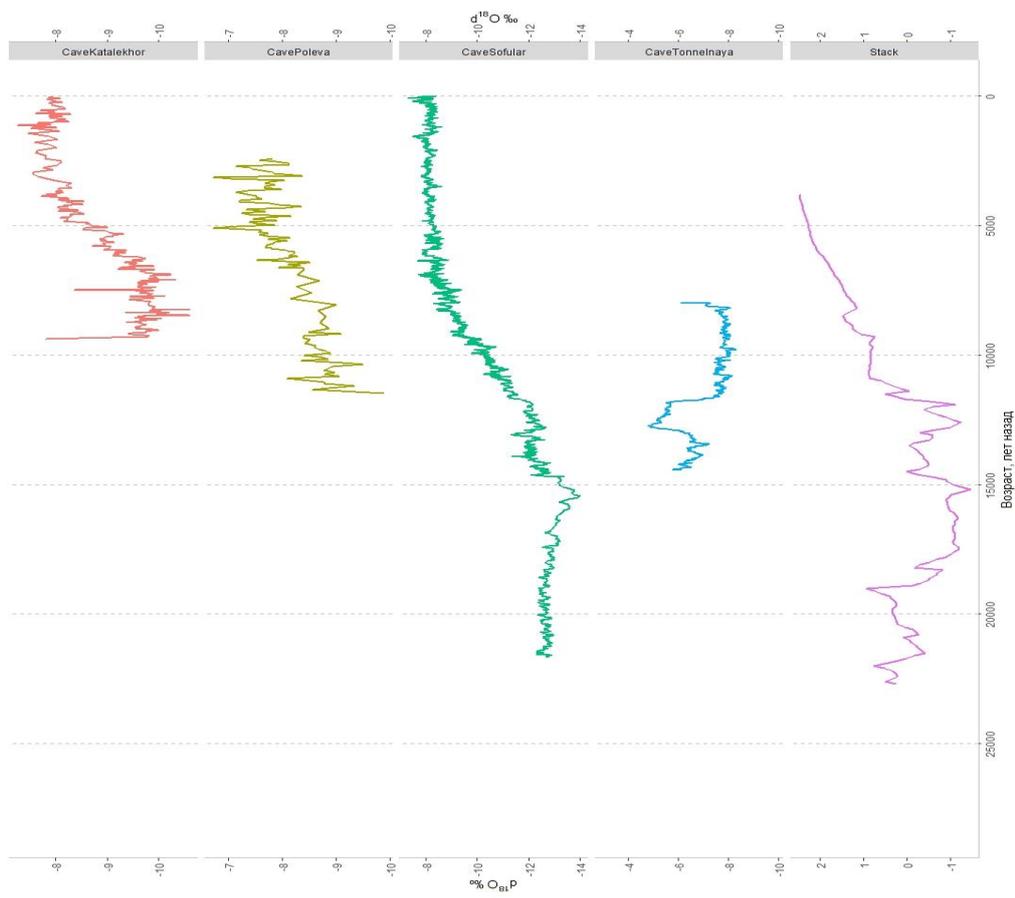


Рисунок 4. Сопоставление изоглобно-кислородных кривых пещер (сверху вниз: пещера Кагалле-Хор, Иран [Andrews et al., 2020], пещера Полева, Румыния [Constantin et al., 2007], пещера Софулар, Турция [Fleitmann et al., 2009], пещера Тоннельная, Узбекистан [Cheng et al., 2016]) и Каспийского моря [автор диссертационной работы].

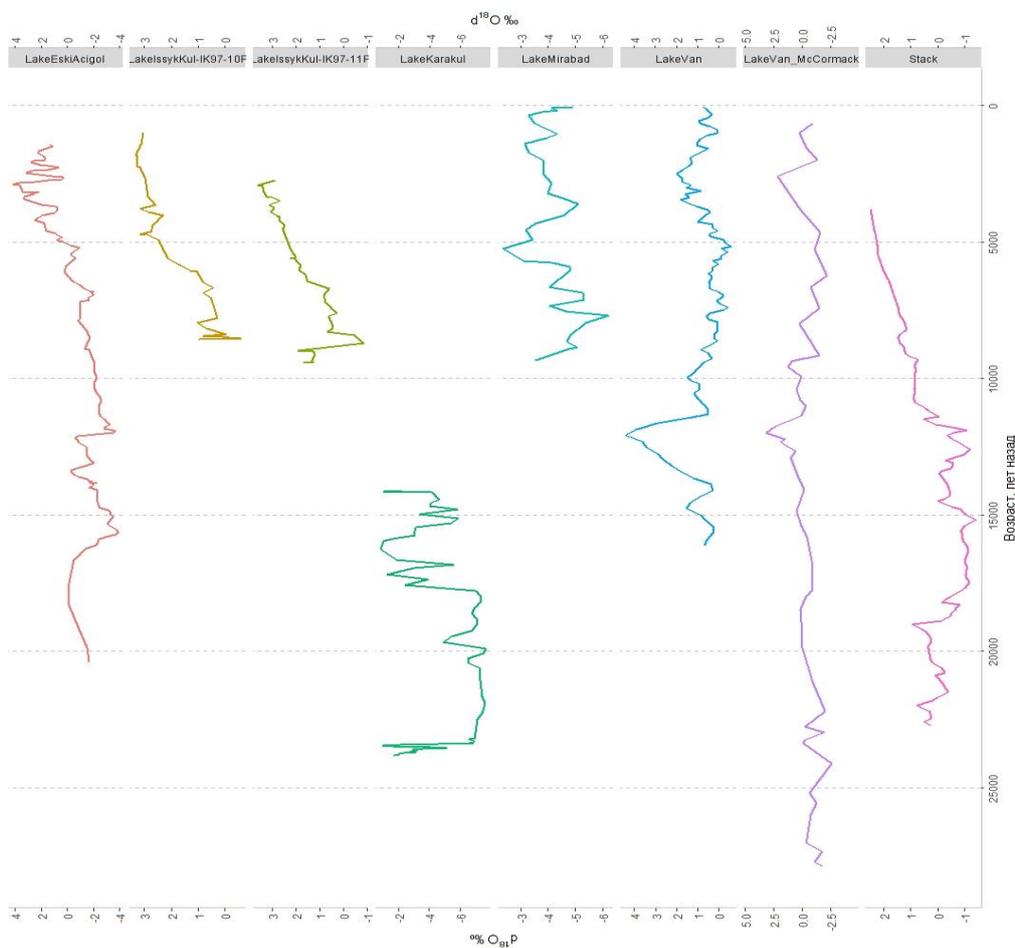


Рисунок 5. Сопоставление изоглобно-кислородных кривых озер (сверху вниз: озеро Старый Ачиголь, Турция [Roberts et al., 2001, 2008], озеро Иссык-Куль, Киргизия [Ricketts et al. 2001], озеро Каракуль, Таджикистан [Aichner et al., 2019], озеро Мирабад, Иран [Stevens et al., 2006], озеро Ван, Турция [Lemcke, Sturm, 1997; Wick et al., 2003], озеро Ван, Турция [McCormack, 2019]) и Каспийского моря [автор диссертационной работы].

Анализ обобщенной изотопно-кислородной кривой (Рисунок 2) позволяет выявить важную закономерность. В изученном интервале времени изменение  $\delta^{18}\text{O}$  Каспийского моря происходит согласно двум принципам, выделяемым по характеру климатического отклика. Первый связан с позднеледниковым временем, для которого четко прослеживается глобальный климатический сигнал – реакция изотопно-кислородной кривой подчинена ходу температурного режима и изменению  $\delta^{18}\text{O}$  ледниковых кернов Гренландии, что отчетливо видно на Рисунке 3. Динамичные, высокоамплитудные климатические перестройки во всем Северном полушарии и в регионах, подверженных, в частности, влиянию Скандинавского ледникового покрова, явившиеся причиной пульсационного характера трансгрессивно-регрессивной ритмики Каспия и изменения характеристик его водной среды, позволили сформироваться изотопно-кислородному составу в точном соответствии с глобальными и региональными изменениями климата. Напротив, для периодов относительной стабилизации климата – например, во время поздневалдайского оледенения или большей части голоцена – система Каспийского моря приходила в подобие равновесия, при котором параметры водной среды, регулируемые климатическими изменениями, поддерживались на постоянном уровне, тем самым позволяя выйти на передний план локальным (или внутренним) механизмам, определяющим изотопно-кислородный состав. Иными словами, в транзитный, переходный от оледенения к межледниковью, этап изменение изотопного состава морских осадков явилось результатом периодических изменений климата в сторону похолоданий и потеплений и изменений изотопного состава атмосферных и поверхностных вод (аналогичных проявлению широтного эффекта). При этом во время Последнего Ледникового максимума главным фактором, подчиняющим себе ход изотопно-кислородной кривой, являлось сокращение приходных составляющих водного баланса, а в голоцене – увеличение расходных. То есть локальные механизмы Каспия, как изолированной от Мирового океана озерной системы, скрадывали глобальный климатический сигнал.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования достигнута цель диссертации – установлена палеогеографическая связь между изотопно-кислородной летописью Каспия, его трансгрессивно-регрессивной ритмикой и климатическими изменениями в Северном полушарии в конце позднего плейстоцена и в голоцене. Обратимся к основным выводам проделанной работы.

1) Рассмотрение связи между основными гидрологическими показателями воды, в которой формируются раковины остракод, позволило подтвердить непрерывное изменение  $\delta^{18}\text{O}_w$  под воздействием испарения и конденсации и установить тесную связь  $\delta^{18}\text{O}_w$  с температурой и соленостью, которая особенно велика для центральных зон Южного и – в меньшей степени – Среднего Каспия. На примере изучения взаимосвязи между  $\delta^{18}\text{O}_w$ , T и S удалось отчетливо проследить определяющее влияние, которое оказывает на изотопный состав глубина моря и удаленность от источника пресной воды (близость рек). Дополнительный вклад может вносить сезонность изменения характеристик водных масс. Полученные результаты указывают на существование гораздо более сложных связей и факторов, обуславливающих измеряемый в лаборатории результат. Без их учета и, что не менее важно, без учета их изменчивости во времени можно получить недостоверные выводы.

2) Современный состав микрофауны остракод как в количественном, так и в качественном отношении изменяется по мере удаления от берега с возрастанием глубины – в соответствии с геоморфологическими, гидрологическими и экологическими условиями. На глубинах более 200 м главным характерным признаком

является изменение внешнего облика остракод – начинает проявляться шиповатая, бугорчатая или ячеистая скульптура раковин.

3) Выяснено, что различия полученных результатов при разных способах пробоподготовки оказались несущественными – для  $\delta^{18}\text{O}$  около 0.2‰. Наибольшее отклонение установлено для техники предварительного замачивания в перексиде водорода без последующей промывки дистиллированной водой. Поскольку итоговый результат позволяет утверждать, что предварительная обработка не оказывает заметного влияния на изотопный состав раковин остракод, автор полагает, что помимо физического очищения налипшего материала, никакой предварительной обработки для четвертичных остракод в хорошем состоянии сохранности не требуется. Работа по такой системе исключает потерю проб и повторное загрязнение на этапе предварительной обработки, а также снижает рабочую нагрузку, существенно упрощая пробоподготовку.

4) Подтверждено, что одним из важнейших факторов, определяющих  $\delta^{18}\text{O}$  каспийских остракод, является изотопное смещение, связанное с их жизненным циклом (метаболически обусловленное). Его влияние на фракционирование изотопов кислорода видоспецифично и в среднем приводит к положительным отклонениям относительно ожидаемого равновесного формирования кальцита на величину около 1‰. Установленное для шести наиболее часто встречающихся в современном Каспии видов остракод изотопное смещение позволит широкому кругу специалистов использовать его в работах, связанных с изучением  $\delta^{18}\text{O}$ . Одним из важнейших наблюдений стало изотопное смещение по смешанному комплексу остракод, которое оказалось эквивалентно среднему изотопному смещению и составило +1‰ ( $\pm 0.5$ ). Можно заключить, что использованием в одном измерении раковин нескольких видов можно добиться сглаживания сигнала, вызванного жизненными эффектами остракод. Значит, в случае, когда невозможно отобрать один и тот же вид для исследования – например, при работе с материалами бурения, допустимо отбирать для анализа стабильных изотопов смесь остракод, желательно близкородственных.

5) На основе установленных закономерностей дана оценка возможности палеотемпературных реконструкций. По всей выборке в среднем прогнозируемая температура превышала фактически измеренную всего на 0.45 °C. Наибольшей оказалась разница между измеренной и вычисленной температурами для образцов, состоящих из смеси видов (-1.72 °C). Проведенная работа позволяет заключить, что предсказанные температуры соответствуют фактическим в точках отбора проб. Применительно к водоему в стационарном состоянии изотопный состав кислорода изученных видов может быть достоверным индикатором температуры воды времени, соответствующего времени кальцификации раковины.

6) Установлено, что изотопный состав остракод определяет принадлежность к типу водных масс. При этом по своей сути водные массы являются собирательным образом, отражающим основные географические закономерности – в это понятие включена комплексная оценка и температуры, и глубины, и солености, и, разумеется, зависящего от них показателя  $\delta^{18}\text{O}_w$ . Температурный сигнал имеет обратную зависимость от глубины моря в то время, как для остальных факторов эта зависимость прямая. Изотопно-кислородный состав остракод в целом выше у тех экземпляров, которые формировали свою раковину в более соленой воде, при этом таксономическая принадлежность остракод не играет существенной роли. Наряду с близостью рек глубинная стратификация вод играет крайне важную роль в современном распределении измеренных  $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$  в Каспийском море. Фактор глубины в современных пробах скрадывает климатический (температурный) сигнал. Изменчивость изотопно-кислородного состава остракод на мелководье объясняется высокоамплитудным

перепадом температуры в течение года, между тем как на глубине почти круглый год сохраняются гомотермические условия, и такие контрасты оказываются сглажены. Наиболее значимыми факторами, оказывающими влияние на изотопный состав остракод через изотопный состав воды, в которой формируется раковина, являются абиотические – географические. Благодаря проведенной работе становится возможным решение обратной задачи – идентификации свойств водной массы по значениям  $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ , что может быть успешно применено при палеогеографических реконструкциях.

7) В результате изучения керна колонок и скважин выделено несколько сменяющих друг друга этапов осадконакопления, соответствующих разным стадиям развития Каспийского моря в прошлом. Вместе со сменой бассейнов происходила смена фаунистических комплексов. Автором реконструированы три фазы развития Каспийского моря. Первая, соответствующая нижним вскрытым горизонтам, сопоставляется с трансгрессивной эпохой по относительному изотопному облегчению, при этом утверждать, была ли это самостоятельная трансгрессивная фаза или же постепенное снижение уровня, по приведенным данным затруднительно. Обычно отложения представлены серовато-коричневыми алевритисто-глинистыми илами с характерной глубоководной и холодолюбивой микрофауной. По характеру и экологическим особенностям микрофауны остракод вышележащих отложений можно сделать вывод о снижении уровня моря. Толщи, содержащие более теплолюбивую микрофауну остракод с представителями, выдерживающими повышенную соленость, несомненно, отлагались на меньших глубинах, чем в настоящее время. Не противоречит этому и литологический состав вмещающих отложений. Данная фаза, осадки которой залегают с размывом на нижележащих, характеризуются заметным утяжелением изотопного состава и ростом солености, сопоставляется с регрессией Каспия. Заключительная фаза – трансгрессия моря, внутри которой прослеживается как минимум один этап более высокого положения уровня, чем в настоящее время. Отложения сероватого цвета и более тонкого гранулометрического состава вмещают характерный комплекс, представленный типичными для современного Каспия остракодами. В его составе наблюдаются различия в доминирующих видах, что объясняется разным физико-географическим положением точек изучения. В результате выделено три стратиграфических горизонта, соответствующих хвалынской трансгрессивной эпохе, мангышлакской регрессии и новокаспийской трансгрессии.

8) Сбор, обобщение и унификация радиоуглеродных данных позволили осуществить переход от шкалы глубин к шкале возраста при построении кривой изменения  $\delta^{18}\text{O}$ , реализовать возрастную привязку трансгрессивно-регрессивных событий, сопоставить их с климатическими событиями, оказавшими решающее влияние на колебания уровня Каспийского моря, и обосновать построение обобщенной изотопно-кислородной кривой. Благодаря проведенным микрофаунистическим исследованиям автора и анализу литературных данных удалось определить основные возрастные рубежи и создать более надежную возрастную модель, которая послужила основой обобщенной изотопной кривой наряду с опубликованными материалами глубоководного бурения Каспия.

9) В диссертационном исследовании впервые для Каспийского моря создана обобщенная изотопно-кислородная кривая – «stack», включающая личные изотопно-кислородные измерения автора (по 9 кернам из Среднего и Южного Каспия) и литературные данные (3 кривых). Надежно датированный интервал обобщенной изотопно-кислородной кривой охватывает последний ледниковый максимум, позднеледниковье и голоцен. Сравнительный анализ результирующей кривой с региональными и глобальными палеоархивами убеждает в существовании тесной взаимосвязи Каспия с другими природными системами и позволяет выявить важную

закономерность. В изученном интервале времени изменение  $\delta^{18}\text{O}$  Каспийского моря происходит согласно двум принципам, выделяемым по характеру климатического отклика. В транзитный, переходный от оледенения к межледниковью, этап четко прослеживается глобальный климатический сигнал. Изменение изотопного состава морских осадков явилось результатом периодических изменений климата в сторону похолоданий и потеплений и изменений изотопного состава атмосферных и поверхностных вод (аналогичных проявлению широтного эффекта). Напротив, в периоды относительной стабилизации климата – во время поздневалдайского оледенения или большей части голоцена – система Каспийского моря приходила в подобие равновесия, при котором параметры водной среды, регулирующиеся климатическими изменениями, поддерживались на постоянном уровне, тем самым позволяя выйти на передний план внутренним механизмам Каспия, определяющим изотопно-кислородный состав. Главным фактором, подчиняющим себе ход изотопно-кислородной кривой, является изменение составляющих водного баланса (во время Последнего Ледникового максимума – сокращение приходных, а в голоцене – увеличение расходных). Тем самым доказано, что на определенных этапах каспийской истории локальные механизмы могли скрадывать глобальный климатический сигнал.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**В журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.14:**

1. **Berdnikova** (Ткач) А., Lysenko E., Makshaev R., Zenina M., Yanina T. Multidisciplinary Study of the Rybachya Core in the North Caspian Sea during the Holocene // Diversity. — 2023. — 15, №150. — DOI: 10.3390/d15020150 (*5-летний импакт-фактор 2,5*).
2. **Бердникова** (Ткач) А.А., Джавадова А. Методика подготовки остракод для изотопно-кислородного анализа в Каспийском регионе // Естественные и технические науки. — 2022. — 11, №17(174). — С. 162-166. — DOI: 10.25633/ETN.2022.11.15 (*5-летний импакт-фактор РИНЦ 0,336*).
3. **Бердникова** (Ткач) А.А. Проблемы изотопной палеотермометрии для Каспийского моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5 Геогр. — 2021. — 6. — С. 51–61. (*5-летний импакт-фактор РИНЦ: 1,146*).
4. Yanina T., Bolikhovskaya N., Sorokin V., Romanyuk B., **Berdnikova** (Ткач) А., Tkach N. Paleogeography of the Atelian regression in the Caspian Sea (based on drilling data) // Quaternary International. — 2021. — 590. — P. 73-84. — DOI: 10.1016/j.quaint.2020.07.023 (*5-летний импакт-фактор 2,223*).
5. Янина Т.А., **Бердникова** (Ткач) А.А., Ткач Н.Т. Малакофауна Иранского побережья Каспия в голоцене // Естественные и технические науки. — 2020. — 3. — С. 143-150 (*5-летний импакт-фактор РИНЦ 0,336*).

### Главы в монографиях:

6. **Бердникова** (Ткач) А.А. К вопросу об изотопной палеотермометрии Каспийского моря // Актуальные проблемы палеогеографии плейстоцена. Научные достижения Школы академика К.К. Маркова. (Под ред. Т.А. Яниной, Н.С. Болиховской, Е.И. Поляковой, Т.С. Ключиткиной, Р.Н. Курбанова). — М.: Географический факультет МГУ Москва, 2020. — С. 358-364.

### Публикации в материалах конференций:

7. **Berdnikova** (Ткач) А.А., Tkach N.T. Post-LGM Caspian Sea paleogeography in the prospect of stable oxygen record // PAGES AGADIR 2022 6th Open Science Meeting "Learning from the past for a sustainable future" — Agadir, Morocco, 2022. — С. 103-104.

8. Tkach N., **Berdnikova** (Ткач) **А.**, Makshaev R., Yanina T. Stable isotope geochemistry for the modern ostracods in the Caspian Sea // IAL IPA 2022 Lagos, Memorias del Territorio (Lakes, Memories of the Landscape) — Bariloche, Argentina, 2022. — С. 109.
9. **Berdnikova** (Ткач) **А.**, Makshaev R., Tkach N., Yanina T. Stable oxygen and carbon geochemistry for the first Caspian Sea stack // IAL IPA 2022 Lagos, Memorias del Territorio (Lakes, Memories of the Landscape) — Bariloche, Argentina, 2022. — С. 101.
10. **Бердникова** (Ткач) **А.А.**, Зенина М.А., Макшаев Р.Р., Штыркова Е.И., Янина Т.А. Новые данные о развитии шельфа Северного Каспия в голоцене по материалам изучения структуры Рыбачья // Экзолит - 2022. Годичное собрание (научные чтения). Москва, 15-16 июня 2022 г: Сборник материалов. — ООО "МАКС Пресс" (Москва), 2022. — С. 22-24.
11. Sorokin V., Yanina T., Bolikhovskaya N., **Berdnikova** (Ткач) **А.**, Tkach N. Late Quaternary regressions in the Caspian Sea // Geological Society of America Abstracts with Programs. Vol 53, No. 6, ISSN 0016-7592. — United States, 2021. — DOI: 10.1130/abs/2021AM-364725.
12. **Berdnikova** (Ткач) **А.** Stable oxygen isotope method restrictions for paleotemperature reconstructions in the Caspian Sea // Geological Society of America Abstracts with Programs. Vol 53, No. 6, ISSN 0016-7592. — United States, 2021. — DOI: 10.1130/abs/2021AM-365208.
13. **Бердникова** (Ткач) **А.А.**, Зенина М.А., Янина Т.А., Чеховская М.П. Изменение условий среды в голоцене на северном шельфе Каспийского моря // Геология морей и океанов: Материалы XXIV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. — Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Москва), том 1, 2021. — С. 26-29.
14. **Бердникова** (Ткач) **А.А.**, Янина Т.А., Зенина М.А., Сорокин В.М. Изотопная палеогеография бассейнов Понто-Каспия в конце плейстоцена - начале голоцена // Проблемы палеоэкологии и исторической геоэкологии. Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной памяти профессора В.Г. Очева. — Самара, 2021.
15. **Бердникова** (Ткач) **А.А.**, Янина Т.А., Сорокин В.М., Романюк Б.Ф. Корреляция бассейнов Понто-Каспия в позднем квартере (по материалам бурения) // Пути эволюционной географии – 2021. Материалы II Всероссийской научной конференции, посвященной памяти профессора А.А. Величко (Москва, 22-25 ноября 2021 г.). — ФГБУН ИГ РАН, том 2, 2021. — С. 471-475.
16. **Бердникова** (Ткач) **А.А.** Ограничения использования изотопно-кислородного метода в качестве палеотермометра в Каспийском море // Экзолит – 2021. Годичное собрание (научные чтения). Москва, 25-26 мая 2021 г.: сборник научных материалов. — ООО "МАКС Пресс" (Москва), 2021. — С. 73-75.
17. **Бердникова** (Ткач) **А.А.**, Янина Т.А., Зенина М.А., Сорокин В.М. Бассейны Понто-Каспия в условиях последней ледниковой эпохи // Актуальные проблемы палеогеографии плейстоцена и голоцена: Материалы Всероссийской конференции с международным участием Марковские чтения 2020 года. Отв. редакторы Н. С. Болиховская, Т. С. Ключевиткина, Т. А. Янина. — Географический факультет МГУ (Москва), 2020. — С. 54-57.
18. **Бердникова** (Ткач) **А.А.**, Янина Т.А., Зенина М.А., Сорокин В.М. Первые результаты изучения осадочной толщи Чёрного и Каспийского морей времени последней ледниковой эпохи // Экзолит – 2020. Годичное собрание (научные чтения), посвященные 215-летию основания Московского общества природы. Москва, 25-26 мая 2020 г. Сборник научных материалов. — ООО "МАКС Пресс" (Москва), 2020. — С. 95-97.
19. **Berdnikova** (Ткач) **А.А.**, Yanina T.A., Zenina M.A., Sorokin V.M. Correlation of the Ponto-Caspian basins during the MIS2 based on stable oxygen isotope analysis // Proceeding of 3d plenary meeting and field trip of INQUA IFG 1709F POCAS, 11-18 October 2019. — Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, 2019. — С. 14-17.
20. **Berdnikova** (Ткач) **А.**, Garova E.S., Wesselingh F.P., Yanina T.A., Stoica M., van de Velde S. First results of stable oxygen isotope analysis of Late Pleistocene sediments in the North Caspian basin // Proceedings of UNESCO-IUGS-IGCP 610 and INQUA POCAS Joint Plenary Conference and Field Trip, October 14-21, 2018, Antalya, Turkey. — Dokuman Evi, Avcilar Istanbul, 2018. — С. 34-36.