

*На правах рукописи*

**Александрин Михаил Юрьевич**

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЗАПАДНОГО  
И ЦЕНТРАЛЬНОГО КАВКАЗА ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА ОСАДКОВ ОЗЕР  
КАРАКЕЛЬ И ДОНГУЗ-ОРУН**

**Специальность: 25.00.25 – Геоморфология и эволюционная география**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание учёной степени  
кандидата географических наук**

**Москва – 2020**

Работа выполнена в отделе гляциологии и лаборатории палеоархивов природной среды  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт географии  
Российской академии наук

**Научный руководитель:** **Ольга Николаевна Соломина**, доктор географических наук, член-корреспондент РАН, директор Института географии РАН

**Официальные оппоненты:** **Субетго Дмитрий Александрович**, доктор географических наук, декан факультета географии Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, г. Санкт-Петербург

**Бляхарчук Татьяна Артемьевна**, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

**Ведущая организация:** Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск

Защита состоится «29» мая 2020 г. в 11:00 на заседании Диссертационного совета Д 002.046.03 в Институте географии Российской Академии наук по адресу: 119017 Москва, Старомонетный пер., 29

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института географии РАН по адресу: 119017 Москва, Старомонетный пер., 29 и на сайте Института: <http://igras.ru/defences>

Автореферат разослан «    »                    2020 г.

Отзывы на автореферат (на бумажных носителях в двух экземплярах, заверенные подписью и печатью и в электронном виде в формате PDF) просим направлять по адресу 119017, г. Москва, Старомонетный пер, д. 29, ученому секретарю Диссертационного совета Д 002.046.03, e-mail: [d00204603@igras.ru](mailto:d00204603@igras.ru)

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат географических наук



Е.А. Белоновская

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

В современных условиях глобальных изменений климата детальные реконструкции климатических параметров и палеогеографических условий прошлого представляются первостепенной задачей. Они необходимы как для понимания природной составляющей динамики наблюдаемых параметров, так и для оценки антропогенного вклада и долгосрочных прогнозов изменений климата. Ряд прямых метеонаблюдений на планете в среднем имеет продолжительность около 150 лет (CRUTEM4, Osborn and Jones, 2014). Эти данные представляют собой важный аргумент в пользу текущего роста глобальной температуры воздуха ( $0,89^{\circ}\text{C}$  за период с 1901 по 2012 г. по данным IPCC 5, 2013). Тем не менее, для понимания антропогенной составляющей текущих изменений климата необходимо понимание изменчивости климата недавнего прошлого. Такие представления способны дать косвенные (так называемые “проху”) данные.

Донные осадки озер являются одним из наиболее полных природных палеоархивов. Будучи адекватно расшифрованной, озерная летопись способна восстановить целый ряд параметров, соответствующих моменту поступления осадка в озеро. Озерные осадки с успехом использовались во всех регионах мира для реконструкции параметров климата и условий среды в разных масштабах. Озерные осадки обладают рядом важных преимуществ: они обеспечивают непрерывную летопись осадконакопления на протяжении всего времени существования озера, что позволяет создавать непрерывные реконструкции параметров климата и условий среды; озерные осадки способны обеспечивать значительный охват по времени – от десятков лет до миллионов лет; озерные осадки в сочетании с современными аналитическими методами возможно расшифровывать с высоким пространственным разрешением, что обеспечивает реконструкции с годичным и даже сезонным разрешением; озерные осадки потенциально предоставляют не один, а множество параметров в качестве основы для палеореконовструкций.

В отличие от многих других горных районов мира (Альпы, горы Скандинавии, Скалистые горы, Анды и др.), голоценовая история климата и оледенения Кавказа по-прежнему известна лишь в общих чертах. Все, что лежит за рамками прямых наблюдений является предметом косвенных палеоклиматических данных. Непрерывных климатических реконструкций для Кавказа известно крайне мало. Наиболее длинная из них имеет продолжительность около 400 лет и основана на дендрохронологических данных (Dolgoва, 2016). Хронология, построенная на основе ледникового керна, полученного на западном плато г. Эльбрус, охватывает 240 лет (Kutuzov et al., 2019). В целом даже временные рамки и амплитуда основных климатических событий наиболее изученных последних двух тысячелетий, таких как Римский оптимум, средневековый оптимум и малый ледниковый период, остаются размытыми (Solomina et al., 2016a).

История исследований озерных осадков в России насчитывает около полутора столетий (Субетто, 2009). Изначально озерные осадки рассматривались с позиции хозяйственного использования. С развитием новых аналитических методов в 1930-1940-е годы начинается начинают рассматриваться теоретические вопросы формирования озер и накопления осадка. Появляются биостратиграфические методы – спорово-пыльцевой и диатомовый анализ, – которые положили начало палеогеографическим реконструкциям на основе лимнологических данных. В 1950-1970-е годы исследования озерных осадков велись на значительной части территории страны: на севере Восточно-Европейской равнины (озера Ладожское, Онежское, Ильмень и др., (История Озер Восточно-Европейской равнины, 1992)), в центре Русской равнины (Корде, 1960), на Кольском полуострове, в Карелии и на Валдае (Озера различных ландшафтов..., 1969; 1974), на Дальнем Востоке (Никольская, 1952). В последние десятилетия с развитием современных аналитических методов озерные осадки стали активно использоваться для создания детальных реконструкций климатических параметров и условий среды прошлого. Работы ведутся на севере Европейской части России (Субетто и др., 2003; Субетто, 2009), на Алтае (Калугин и др., 2009; Дарьин, Калугин, 2015), в Хакасии (Дарьин и др., 2013; 2014; 2015), в Восточном Саяне (Fedotov et al., 2014; Степанова и др., 2015; Trunova et al., 2015). На основании исследования донных осадков озер Восточной Сибири реконструированы недавние колебания ледников (Stepanova et al., 2019).

Исследования донного осадка озер и болот Кавказа активно ведутся с конца прошлого века (Серебрянный и др., 1984; Князев и др., 1992). Е.В. Квавадзе и Ю.В. Ефремов провели обширную работу по палинологическому изучению озерных и озерно-болотных отложений на Кавказе (Kvavadze and Efremov, 1996; Квавадзе и др., 1994). Ю.В. Ефремов внес вклад в понимание происхождения, современного состояния и особенностей развития озер Большого Кавказа, являясь автором множества работ на эту тему (Ефремов, 1984; 1993; 2003 и др.) А. Зимницкий развил концепцию озерного морфолитогенеза на Западном и Центральном Кавказе, детально описав формирование распределение и динамику приледниковых озер на Западном Кавказе (Зимницкий, 2005).

Для Кавказа – региона, богатого озерами разного возраста и генезиса озерные осадки являются природным архивом, который способен в значительной степени прояснить палеоклиматическую картину региона. Настоящая работа рассматривает два принципиально разных объекта – озера Донгуз-Орун и Каракель – в качестве двух примеров возможностей применения палеолимнологического метода на Кавказе: высокого разрешения и изучения современных процессов с одной стороны и значительного охвата по времени – с другой.

**Цель работы** – комплексный анализ донных осадков озер Западного и Центрального Кавказа с целью выявления их потенциала в качестве палеоклиматических архивов и реконструкции климатических параметров в регионе.

### **Задачи исследования**

Для достижения поставленной цели в диссертации решались следующие задачи:

- Рекогносцировочные работы, выявление сети подходящих объектов на Западном и Центральном Кавказе
- Полевые работы по отбору кернов донного осадка на озерах Каракель (Западный Кавказ) и Донгуз-Орун (Центральный Кавказ)
- Проведение высокоразрешающих сканирующих анализов кернов озер Каракель и Донгуз-Орун для установления короткопериодной климатической изменчивости
- Проведение анализов керна озер Каракель и Донгуз-Орун с низким разрешением для выявления долгопериодной климатической изменчивости и верификации данных высокого разрешения
- Датирование осадка озера Каракель и создание возрастной модели; создание варвной хронологии для современной части осадка озера Донгуз-Орун
- Установление основных индикаторов климатической изменчивости в донных осадках
- Установление связи свойств донных осадков с метеопараметрами и другими палеоархивами годичного разрешения
- Установление временных рамок основных теплых и холодных периодов на Кавказе за последние 2000 лет, сравнение с глобальными и региональными реконструкциями температуры

### **Научная новизна работы**

Исследования, которые легли в основу настоящей работы, являются одними из первых случаев детального изучения донного осадка озер Кавказа в качестве источника палеоклиматической информации с использованием современных высокоразрешающих аналитических методов. В рамках работы изучен ряд параметров изменчивости донного осадка и их пригодность в качестве палеоклиматических индикаторов. Сделан ряд методических выводов и обобщений, ставших основой для дальнейших палеолимнологических исследований. В рамках настоящей работы впервые на образцах донного осадка озер Кавказа проведен сканирующий элементный анализ методом РФА-СИ с высоким разрешением.

Осадки озера Донгуз-Орун сложены варвами, то есть имеет годичную стратификацию, что было подтверждено с использованием геохимических маркеров высокого разрешения. Это первый подтвержденный случай кластических варвных осадков на Кавказе. Отработана методика выделения границ годичных слоев с помощью соотношения Rb/Sr и других показателей. Впервые на Западном и Центральном Кавказе установлен общий климатический сигнал в двух палеоархивах различного происхождения – озерных осадках и древесных кольцах.

Осадки озера Каракель представляют собой один из первых известных на Кавказе случаев природных архивов, охватывающих весь голоцен. Впервые на Западном и Центральном Кавказе

концентрация брома в осадке использована в качестве непрерывной кривой вариаций теплообеспеченности за последние 2000 лет.

#### **Защищаемые положения:**

1. Установлена и подтверждена ценность исследованных озерных отложений как палеоархивов для реконструкции климатических условий Западного и Центрального Кавказа. Выделено два типа озерных отложений, которые могут быть использованы для палеоклиматических реконструкций разного временного разрешения – от сезонного и годовичного до мультидекадного.
2. Донные осадки озера Донгуз-Орун (Центральный Кавказ) имеют годовичную стратификацию, образованную за счет внутригодовых вариаций гранулометрического состава, то есть являются кластическими варвами. Это подтверждается с помощью геохимического анализа (РФА-СИ) высокого разрешения. Соотношение Rb/Sr использовано для выделения границ годовичных слоев и создания на основе современной части осадка хронологии с годовичным разрешением.
3. Геохимические характеристики осадков озера Донгуз-Орун обнаруживают устойчивые статистически значимые связи с инструментально зарегистрированными температурой воздуха ( $r = 0,41$ ,  $p < 0,01$ ) и количеством атмосферных осадков ( $r = 0,44$ ,  $p < 0,01$ ). Отмечается высокая корреляция геохимических свойств донных осадков и ширины годовичных колец сосны в районе озера ( $r = -0,56$ ,  $p < 0,01$ ), что свидетельствует в пользу достоверности выделенных годовых слоев озерных осадков и общего климатического сигнала, регистрируемого двумя палеоархивами. Это подтверждает ценность донных осадков озера Донгуз-Орун в качестве палеоклиматического архива и пригодность для построения на их основе непрерывных палеореконструкций с годовичным или даже сезонным разрешением.
4. Кривая концентрации брома, полученная с помощью геохимического анализа (РФА-СИ) высокого разрешения для донных осадков озера Каракель (Западный Кавказ), обнаруживает согласованный ход с содержанием пыльцы широколиственных в осадках. Кривая концентрации брома может быть интерпретирована в качестве непрерывного и детального маркера вариаций теплообеспеченности в регионе.
5. Комплексный анализ осадков озера Каракель позволил выделить для Кавказа временные рамки основных климатических событий за последние 1500 лет: средневекового климатического оптимума ( $\approx 770$ -1250 гг.) и трех стадий похолодания малого ледникового периода:  $\approx 1250$ -1400 гг.,  $\approx 1500$ -1630 гг. и  $\approx 1750$ -1880 гг.

**Практическая значимость работы.** Анализ осадков озер Западного и Центрального Кавказа говорит о пригодности свойств озерных осадков для создания реконструкция колебаний климатических параметров и условий среды региона. Исследован ряд горных озер района, выявлены общие закономерности осадконакопления. Все это служит важным фундаментом для

дальнейшей работы по созданию непрерывных количественных реконструкций для региона. Проведенные в рамках подготовки диссертационной работы исследования позволяют прояснить как долгопериодную, так и короткопериодную составляющие климатической изменчивости на Кавказе, что, в значительной степени, проясняет общую картину климата голоцена в регионе и служит основанием для климатического моделирования и прогнозов. Оцененные в этой работе скорости осадконакопления в озерах разных типов на Кавказе могут быть полезны для прогнозирования динамики заполнения осадками горных водохранилищ, что имеет важное практическое значение. Отмеченные закономерности в качестве аналогов современным процессам имеют ценность для уточнения прогнозов, связей выявленных маркеров с катастрофическими нивально-гляциальными и экзогенными явлениями.

**Личный вклад автора.** Работа основана на материале, полученном в ходе полевых работ 2010-2017 в разных районах Западного и Центрального Кавказа. Автор проводил первичный поиск и рекогносцировку объектов полевых работ, буровые работы по отбору кернов донных осадков, полевые работы по отбору других материалов; лабораторные анализы в ИГ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, ИГМ СО РАН и Университете г. Берген, Норвегия; статистическую обработку аналитических данных; обобщения, сопоставления с известными реконструкциями и публикацию материалов.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации были доложены на российских и международных конференциях: Динамика современных экосистем в голоцене. Казань, 2013; Палеолимнология Северной Евразии, Петрозаводск; CL2.13. EGU 2014. European Geophysical Union, Vienna, April 2014; PAGES OSM05, Zaragoza, 2017

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из Введения, трех глав, Заключения, списка литературы и Приложений. Объем работы составляет 153 страниц (включая Приложения), содержит 1 таблицу и 52 рисунка. Список литературы содержит 194 библиографических источников, из них 118 на иностранном языке.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю О.Н. Соломиной за вдохновение и детальное научное сопровождение на каждом из этапов работы. Автор выражает благодарность сотрудникам Института географии РАН В.Н. Михаленко, В.В. Мацковскому, В.А. Шишкову за помощь в проведении буровых работ на Кавказе; В.В. Кузнецовой, Е.А. Долговой, И.С. Бушуевой за помощь в проведении полевых работ и обработке результатов; Атле Несье (Берген, Норвегия) за консультации и возможность использования лаборатории; А.А. Тишкову за консультации и многим другим.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** дана общая характеристика работы, раскрывается её актуальность и научная новизна, обоснованы цели, задачи и практическая значимость исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** рассматриваются методы палеолимнологических исследований. Приведены теоретические основы использования донного осадка горных озер для реконструкции параметров климата. Рассматриваются преимущества озерных осадков как палеоклиматического архива. Приведена история развития палеолимнологических исследований в разных регионах мира (De Geer, 1912; Karlen, 1976; Dahl et al., 1994; Nesje et al., 2001; Bakke et al., 2005; von Gunten, 2012). Рассматриваются основные процедуры полевых работ по отбору материала, лабораторных работ с рассмотрением различных видов анализов донного осадка и методика работы с данными. Описана методика построения количественных реконструкций параметров климата и колебаний ледников водосбора на основе озерных осадков.



*Рис. 1. Расположение объектов исследования*

В **главе 2** рассматривается район работ: Западный и Центральный Кавказ. Приведен обзор геологического строения и рельефа, климатических условий, растительности и почв, современного оледенения района. Отдельно приводятся основные закономерности формирования и распространения горных озер Кавказа и сведения о имевших на настоящий момент место палеолимнологических исследованиях сотрудников и игр на Кавказе.

В работе рассматриваются керны донных осадков двух озер Западного и Центрального Кавказа – Каракель (долина р. Теберда) и Донгуз-Орун (долина одноименного ледника, Приэльбрусье) (Рис. 1)

### Глава 3. Озеро Донгуз-Орун

**Географические условия.** Озеро Донгуз-Орун (43°13'26" с.ш.; 42°29'35" в.д.) находится Приэльбрусье (Центральный Кавказ), в верховьях одноименной реки, правого притока р. Баксан на высоте 2545 м. Озеро образовано в результате подпруживания боковой мореной ледника Донгуз Орун талых ледниковых вод нескольких ледников. Озеро проточное, с несколькими впадающими с ледника ручьями и вытекающим потоком, который образует реку Донгуз-Орун, сливаясь с потоком талых ледниковых вод одноименного ледника в двух км ниже по течению. Площадь поверхности озера около 105 000 м<sup>2</sup>, объем 465 000 м<sup>3</sup>, средняя глубина около 4,5 м с максимумом до 14-15 м. У озера Донгуз-Орун сложный водосбор, состоящий из нескольких ледников. Наиболее крупный из них, Медвежий, имеет площадь около 0,7 км<sup>2</sup>.

**Отбор образцов.** Буровые работы на озере Донгуз-Орун были проведены впервые силами сотрудников Отдела гляциологии Института географии РАН летом 2012 года. Для бурения использовался модифицированный поршневой бур ударного типа (конструкция Атле Несье, Норвегия; Nesje, 1992), установленный на надувной катамаран с помощью специально подготовленной платформы. В результате был получен керн LDOPC12-1 мощностью 26 см.

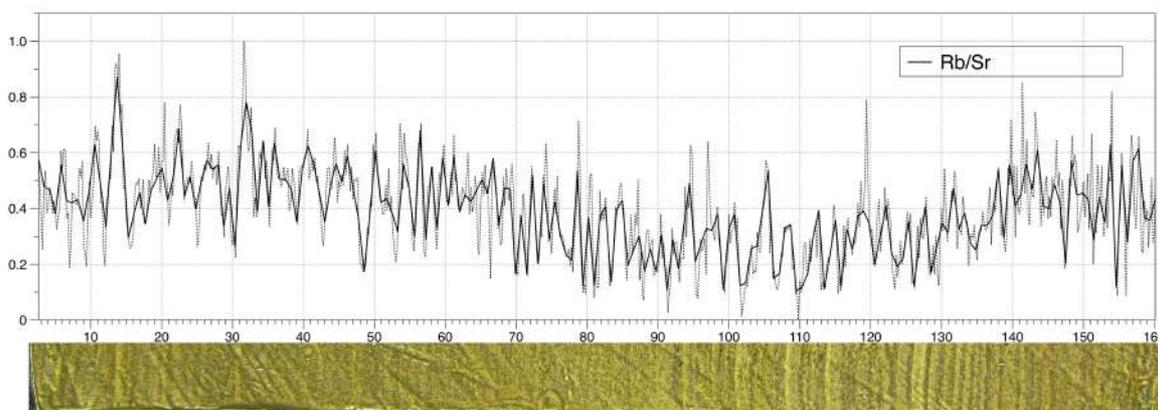
**Лабораторные анализы.** Осадок представлен бежево-коричневой пылеватой глиной с редкими линзами песка и имеет ярко выраженную слоистость. Слоистость регулярная на всей длине керна со средней мощностью отдельных слоев около 1,5 мм. Точное визуальное дешифрирование слоев и их подсчет, однако, затруднительны.

Элементный состав осадка определялся методом сканирующего рентгенофлуоресцентного анализа на пучках синхротронного излучения (РФА-СИ) на керне LDOPC12-1 проводился в Сибирском центре синхротронного излучения (ИЯФ СО РАН, Новосибирск). Влажная плашка 0-160, соответствующая современной части осадка, была сканирована с шагом 200 мкм методом РФА-СИ с определением концентраций К, Са, Тi, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo. Измерение активности искусственного изотопа <sup>137</sup>Cs и естественного изотопа <sup>210</sup>Pb используются для датирования наиболее молодой (верхней) части осадка. Измерения активности <sup>137</sup>Cs и <sup>210</sup>Pb делались в ИГМ СО РАН для образцов из верхней части керна.

Исследование верхней, наиболее современной, части керна донных осадков озера Донгуз-Орун ставило целью подтверждение (или опровержение) двух первоначальных гипотез: гипотеза 1 – визуально заметная в керне слоистость в действительности представлена годично-стратифицированным осадком; гипотеза 2 – осадки озера Донгуз-Орун обладают возможностью регистрировать и воспроизводить климатический сигнал. Это бы означало пригодность донного осадка озера для создания палеореконокструкций высокого разрешения.

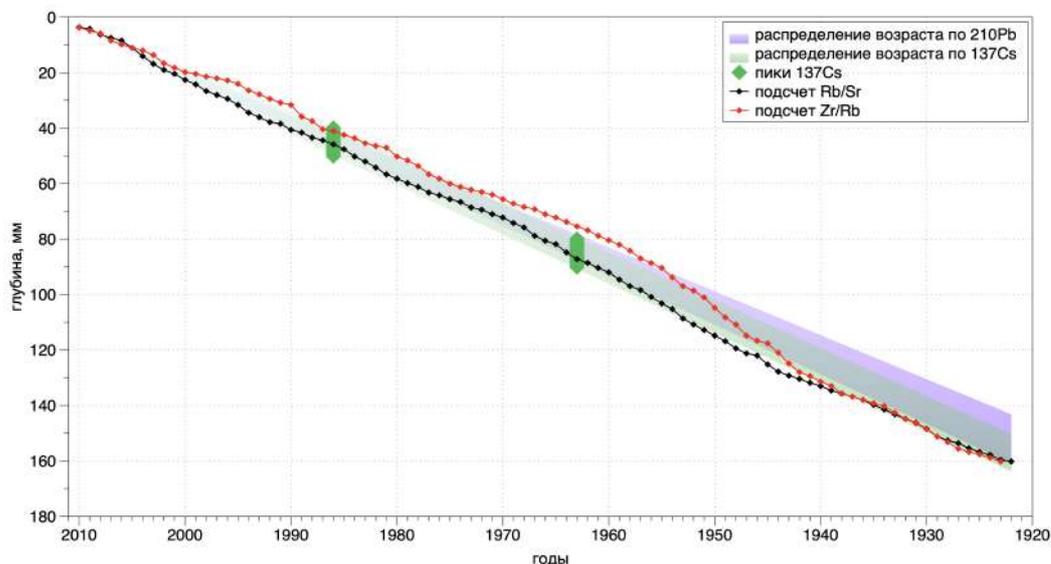
**Создание хронологии.** Традиционная варварная хронология строится на основании визуального подсчета годичных слоев. В случае осадка озера Донгуз-Орун подсчет был затруднен и давал величины в широком разбросе от 70 до 100 слоев на 26 см. Поэтому для дифференциации

предполагаемых годовичных слоев были использованы косвенные маркеры, полученные с помощью анализа РФА-СИ для верхних 160 мм керна, сканированным с шагом 200 мкм. В качестве основного маркера было выбрано соотношение концентраций рубидия и стронция. В основе такого подхода лежит модель гравитационного фракционирования: чем меньше размер частиц, тем больше удельная площадь и сильнее вынос Sr, более подвижного, чем Rb (Дарьин и др., 2015). Подобные внутригодовые вариации размера частиц в целом характерны для приледниковых озер, осадок такого типа принято называть кластическими варвами (Zolichka, 2015). Паводковые слои на кривой Rb/Sr представлены в виде минимумов, тогда как слои более тонкого осадка имеют более высокое Rb/Sr. Всего выделено 88 минимумов, что дает оценку скорости осадконакопления 1,82 мм/год (Рис. 2). В качестве контрольного метода подсчета годовичных слоев использовалось соотношение Zr/Rb, которое ранее применялось в качестве косвенного свидетельства вариаций гранулометрического состава озер Арктики и высотных областей (Dyrvik and Harris, 2001; Kylander et al., 2011).



**Рис. 2.** Профиль Rb/Sr в интервале 00-160 мм, использовавшийся для подсчета годовичных слоев, и фотография соответствующего участка керна

Существенным подтверждением хронологии служит датирование осадка на основе активности изотопов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{210}\text{Pb}$ . В ходе кривой содержания изотопа цезия отмечаются два выраженных пика, которые логично соотнести с 1986 и 1963 гг., в таком случае средняя скорость осадконакопления составит 1,75 мм/год. Скорость осадконакопления, рассчитанная по изотопу  $^{210}\text{Pb}$  (тангенс экспоненциальной кривой), согласуется с этими оценками — 1,69 мм/год. На Рис. 3 представлено сравнение возрастных моделей осадконакопления, полученных с помощью Rb/Sr, Zr/Rb,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{210}\text{Pb}$ . Заметно, что расхождение в целом незначительное, и подсчет годовых слоев по Rb/Sr лучше закреплен пиками цезия, чем Zr/Rb. Тем самым мы считаем хронологию на основе подсчета Rb/Sr основным способом выделения годовичных слоев в осадке и используем этот показатель для создания хронологии с годовичным разрешением.

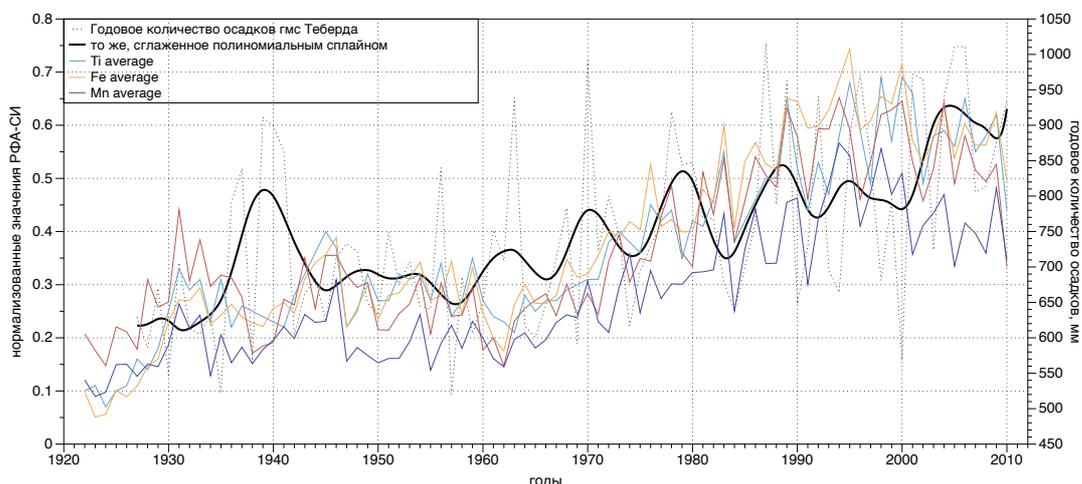


**Рис. 3.** Сравнение хронологий, полученных с помощью подсчета пиков Rb/Sr и Zr/Rb и с помощью содержания изотопов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{210}\text{Pb}$ . Черными и красными точками показаны пики Rb/Sr и Zr/Rb, соответственно; зелеными точками показаны положения двух известных пиков  $^{137}\text{Cs}$ ; затененными зелеными и фиолетовыми областями – распределение глубина-возраст по  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{210}\text{Pb}$ , соответственно.

**Установление климатического сигнала в осадке.** Выделение границ годичных слоев позволяет рассчитать среднее значение концентрации любого из химических элементов, полученного с помощью анализа РФА-СИ, для каждого года на период созданной хронологии, то есть на 1922-2010 гг. Датировка верхнего слоя (2010 г.) объясняется наиболее высокой корреляцией ( $r = 0,4$ ,  $p < 0,05$ ) ширины предполагаемых годичных слоев озера и ширины годичных колец сосны площадки D09s (см. далее). Это дает возможность сравнить геохимические данные с любыми другими региональными рядами данных годичного разрешения, в частности, метеоданными, данными гляциологических балансовых наблюдений и дендрохронологическими сериями. Результаты корреляционного анализа приведены в Приложении 1.

Согласно результатам анализа геохимических данных с помощью метода главных компонент, три компонента суммарно объясняют более 60% общей изменчивости: РС-1 – 41.8%, РС-2 – 10.1%, РС-3 – 7.2%. Основываясь на этих результатах, мы разделяем геохимические данные на две группы: терригенные элементы (Fe, Ti, Mn, Zn) и косвенные индикаторы содержания органического вещества (Vg и Co/Inc).

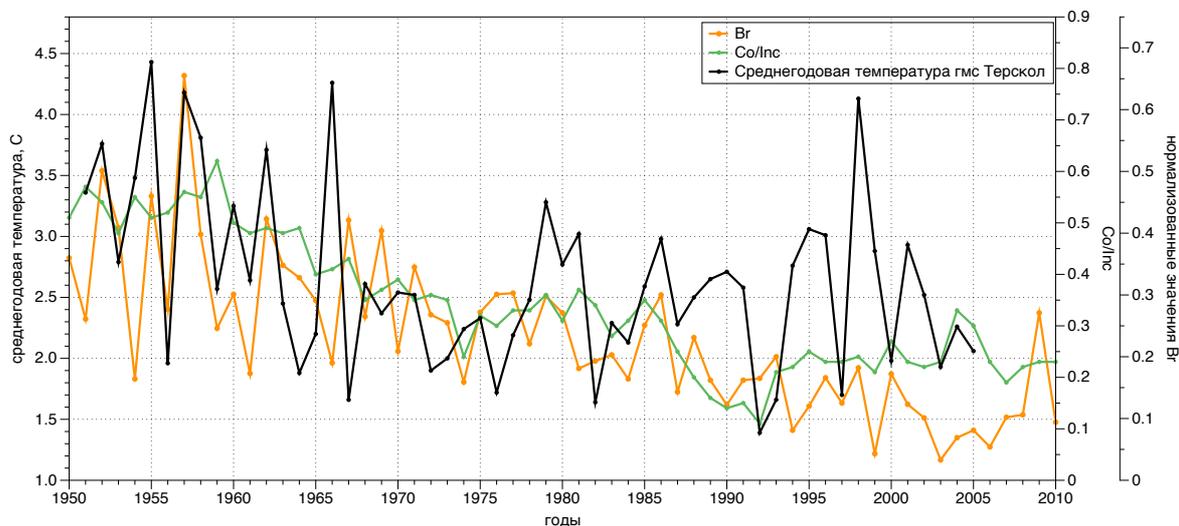
Терригенные элементы поступают в озеро в качестве продуктов выветривания коренной породы водосбора, сложенной докембрийскими и нижнепалеозойскими гнейсами и кристаллическими сланцами. Соответственно, основные источники терригенного материала можно разделить на продукты экзарации ледников водосбора и смыв материала со склонов водосбора, которые в основном не задерживаются, за счет атмосферных осадков.



**Рис. 4.** Сравнение годовой суммы осадков (гмс Теберда) с концентрациями терригенных элементов в осадке озера Донгуз-Орун

При корреляционном анализе наиболее значимо совпадение среднегодовых значений терригенных элементов (*Fe*, *Ti*, *Mn*, *Zn*) и годового количества осадков гмс Теберда (*Ti*:  $r = 0,44$ ,  $p < 0,01$ ; *Fe*:  $r = 0,41$ ,  $p < 0,01$ ; *Zn*:  $r = 0,37$ ,  $p < 0,01$ ; *Mn*:  $r = 0,37$ ,  $p < 0,01$ ) (рис. 4). Особенно заметно совпадение долгопериодных трендов. Вариации концентраций терригенных элементов в осадке озера Донгуз-Орун, по всей видимости, регистрируют комплексный климатический сигнал, который состоит из: 1) годовой суммы атмосферных осадков, ответственной за объем смываемых со склонов водосбора твердых частиц как продуктов разрушения коренных пород; 2) летней температуры, ответственной за абляцию и количество поставляемого в озеро материала флювиогляциального происхождения.

Содержание брома (Br) и параметр  $Co/Inc$  (соотношение когерентного/некогерентного рассеяния рентгеновских лучей) были использованы в качестве косвенных индикаторов вариаций количества органического вещества в осадке ранее (Croudace and Rothwell, 2015; Davies et al., 2015). Бром формирует сильные ковалентные связи с органическими молекулами и может быть использован как для отслеживания аллохтонного органического вещества, так и в качестве индикатора собственной биопродуктивности озера (Gilfedder et al., 2011). При работе с керном озера Каракель бром также использовался в качестве показателя теплообеспеченности. Соотношение  $Co/Inc$  связано с атомным числом и может использоваться в качестве индикатора органического вещества вследствие низкого атомного числа углерода (Croudace et al., 2006). Предыдущие исследования неоднократно показывали схожий ход показателя  $Co/Inc$  и измеренного в осадке содержания общего органического углерода (TOC) (Guyard et al., 2007; Giralt et al., 2011; Liu et al., 2013).

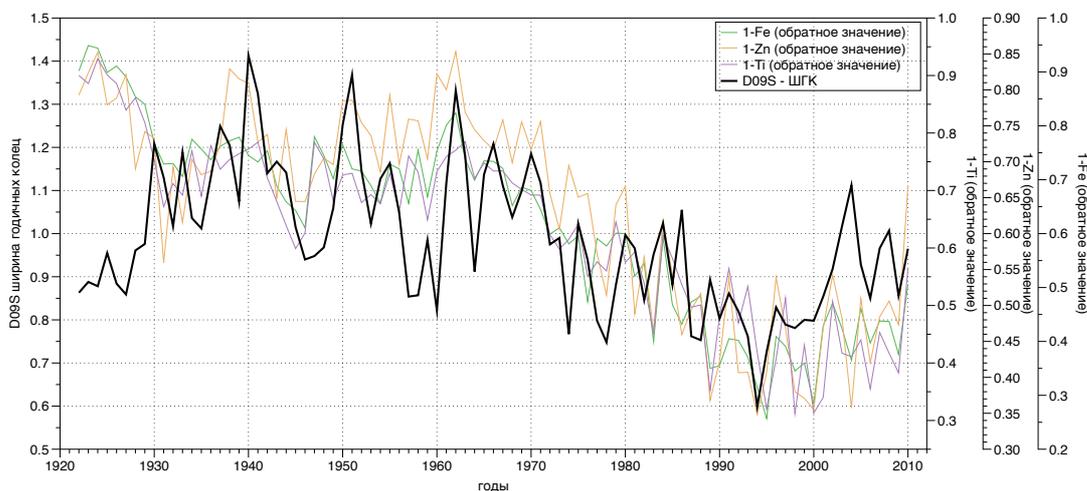


**Рис. 5.** Сравнение среднегодовой температуры (гмс Терскол) с концентрацией брома и показателем Co/Inc

В случае озера Донгуз-Орун Br и Co/Inc показывают устойчивую положительную связь ( $r = 0,82$ ,  $p < 0,01$ ). Оба параметра обнаруживают значимую корреляцию со среднегодовой температурой, зарегистрированной на ближайшей метеостанции поселка Терскол за период 1951-2010 гг. (Br:  $r = 0,41$ ,  $p < 0,05$ ; Co/Inc:  $r = 0,40$ ,  $p < 0,05$ ) (рис. 5). Вариации Br и Co/Inc в осадке, по всей видимости, регистрируют локально-обусловленный процесс, связанный положительно со среднегодовой температурой воздуха как фактора автохтонной биопродуктивности в озере и отрицательно - с годовой суммой осадков, ответственной за объем смываемых со склонов водосбора твердых частиц (так как склоны, окружающие озеро, в основном не задернованы, и смываемый материал – преимущественно минерогенного происхождения).

Особого внимания заслуживает сравнение геохимических данных с результатами дендрохронологических исследований. Для сравнения были использованы 18 хронологий по ширине и плотности годовых колец, отобранных в разных районах Западного и Центрального Кавказа (Dolgova, 2016). Примечательно, что, за отдельными исключениями, корреляционный анализ показывает устойчивую связь геохимических данных озера Донгуз-Орун только с одной площадкой: D09S, ближайшей к озеру. Эта площадка расположена на южном склоне горы Чегет, на расстоянии всего около 3 км от озера Донгуз-Орун вниз по течению одноименного потока.

Наблюдается устойчивая обратная связь значений ширины годовых колец дендрохронологической площадки D09S и концентраций терригенных элементов в осадке озера Донгуз-Орун с высокими для палеоклиматических данных, коэффициентами корреляции (Fe:  $r = -0,51$ ,  $p < 0,01$ ; Ti:  $r = -0,48$ ,  $p < 0,01$ ; Zn:  $r = -0,56$ ,  $p < 0,01$ ; Mn :  $r = -0,55$ ,  $p < 0,01$ ), а также прямая связь для Br ( $r = 0,39$ ,  $p < 0,01$ ). На Рис. 6 представлены обратные значения концентраций терригенных элементов (нормализованные значения вычтены из 1) для удобства визуального сопоставления.



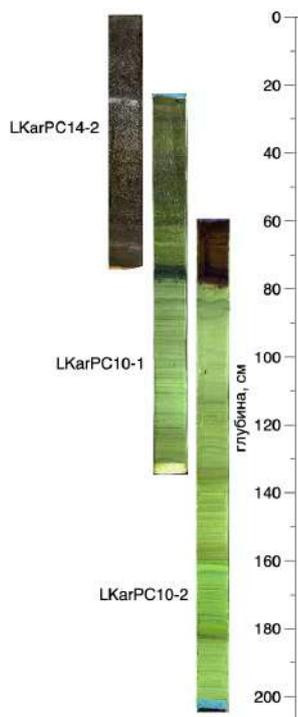
**Рис. 6.** Сравнение индексов ширины годичных колец (площадка D09S) и обратных значений концентраций терригенных элементов.

Сопоставление годично-осредненных данных двух палеоклиматических архивов – донных осадков и годичных колец – показывает высокие значения коэффициентов корреляции (отрицательные для терригенных элементов и положительные для индикаторов органического вещества). При этом каждый из архивов обнаруживает ограниченный климатический отклик на температуру воздуха и количество атмосферных осадков. Высокая корреляция данных из разных источников, видимо, объясняется специфической локально-обусловленной комбинацией климатических факторов формирования донного осадка и годичных колец деревьев. Это свидетельствует в пользу комплексного климатического сигнала, регистрируемого обоими природными архивами. Детальная расшифровка этого сигнала и вклад конкретных агентов является одним из предметов исследований в будущем.

Результаты анализа донного осадка озера Донгуз-Орун последовательно подтверждают обе первоначальные гипотезы: 1) осадок в действительности имеет годовую стратификацию; 2) осадок способен регистрировать комплексный климатический сигнал. Более длинные керны донного осадка озера Донгуз-Орун должны быть в дальнейшем использованы для создания палеоклиматических реконструкций с годичным разрешением.

#### Глава 4. Озеро Каракель

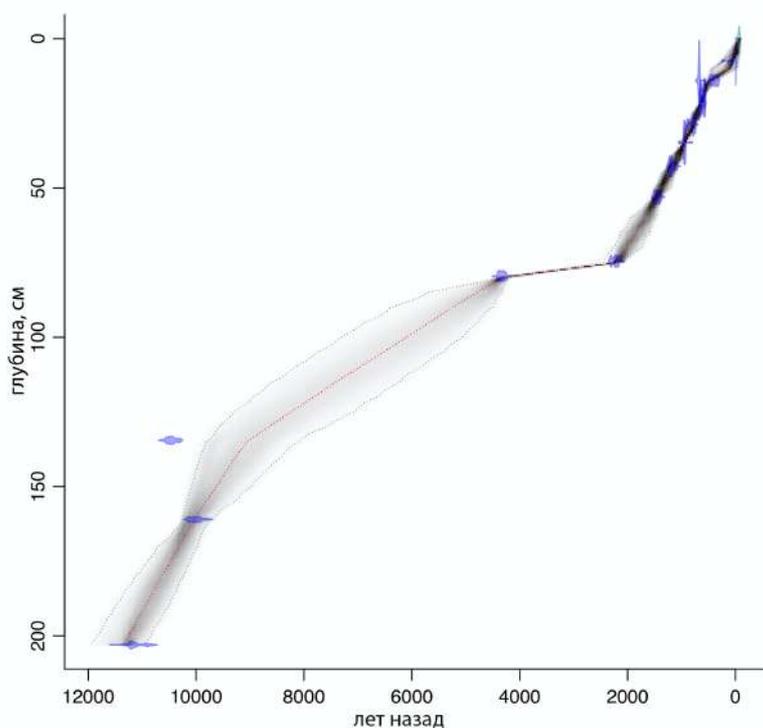
**Географические условия.** Озеро Каракель (43°26'13" с.ш.; 41°44'36" в.д.) располагается в пределах западной высокогорной провинции Большого Кавказа, в долине р. Теберда, берущей свое начало на склонах Главного Кавказского хребта. Озеро расположено на абсолютной высоте 1335 м, имеет продолговатую форму, и вытянуто в направлении простираения долины. Размеры озера составляют около 140 x 280 м, глубина на основной площади озера колеблется незначительно и составляет в среднем 9 м. Основное питание озера осуществляется за счет атмосферных осадков и снеготаяния, расход – путем испарения и фильтрации.



*Рис. 7. Стратиграфия донного осадка озера Каракель (керны 2014 и 2010 гг).*

**Отбор образцов.** Впервые керновое бурение донного осадка озера Каракель было произведено в августе 2010 года в рамках полевой экспедиции Отдела гляциологии Института географии РАН. Керновое бурение производилось модифицированным поршневым буром ударного типа конструкции Атле Несье (Nesje, 1992). В качестве платформы использовались рекреационные металлические катамараны. Бурение производилось в центральной части озера с глубины 9,5 м. Было получено два керна с ненарушенной структурой, перекрывающих друг друга по глубине отбора (первый - с глубины от 0-150 мм до 1000-1100 мм (кern LKarPC10-1), второй - от ~350-400 мм до 1800-1850 мм (кern LKarPC10-2)). Повторное бурение озера проводилось в августе 2014: получен kern LKarPC14-2.

**Лабораторные анализы.** Опорный разрез для озера Каракель был составлен основании трех кернов донного осадка: двух кернов, полученных в 2010 г. (LKarPC10-1 и LKarPC10-2), и керна, полученного в 2014 году (LKarPC14-2). Основываясь на стратиграфическом анализе опорного разреза озера Каракель (Рис. 7), можно выделить три характерных горизонта. Первый (горизонт А); от границы вода-осадок до глубины 74-76 см представлен желеобразным тонкослоистым сапропелем. На глубине 20-21 см расположен характерный белесый прослой. Второй (горизонт В) до глубины 79-80 см – тёмно-серой, с зеленоватым оттенком, тонкослоистой и сильно обогащённой органическим веществом гиттией. Третий (горизонт С) (с глубины 80 см до конца керна 203 см) – серо-бежевой глиной, иногда с коричневыми прослоями, мощностью 1–2 мм.



**Рис. 8.** Возрастная модель накопления осадка в озере Каракель (создана с помощью алгоритма Bacon для среды R)

Возрастная модель осадконакопления в озере Каракель основана на тринадцати датировках, полученных радиоуглеродным методом с помощью ускорительной масс-спектрометрии. Возраст осадка озера охватывает весь голоцен (базальная датировка – около 11200 лет назад, калиброванный возраст). Нижняя часть (11700-4200 лет назад) соответствует литостратиграфическому горизонту С, эта часть закреплена относительно слабо, на этот период приходится четыре радиоуглеродных датировки. На период 4200-2200 лет назад, соответствующий горизонту В, приходится перерыв в накоплении осадка. Верхняя часть осадка (2200 лет назад – настоящее время) надежно хронологически закреплена с помощью десяти датировок, полученных радиоуглеродным методом. Создание возрастной модели было произведено с помощью алгоритма Bacon (Blaauw and Christen, 2011) для программной среды R. Для построения возрастной модели с помощью Bacon была использована калибровочная кривая IntCal13 (Reimer et al., 2013). На Рис. 8 представлена общая возрастная модель для мастер-керна озера Каракель.

Для керна озера Каракель был сделан ряд анализов, включающий как традиционные для озерных осадков, так и современные высокоразрешающие методы. Анализ на массовые потери при прокаливании для определения количества органического углерода был проведен с шагом 1 см в диапазоне глубин 0-60 см, с шагом 2 см в диапазоне 60-140 см и с шагом 4 см в диапазоне 120-203 см. В результатах отчетливо заметна дифференциация содержания органического углерода в соответствии с литостратиграфическими горизонтами. Анализ магнитной восприимчивости осадка был проведен на образцах горизонта С (глубина 80-200 см) с шагом 2

см в диапазоне 80-140 см и с шагом 4 см в диапазоне 140-200. Гранулометрический анализ был проведен на образцах горизонта С (глубина 60-180 см) с шагом 2 см в диапазоне 60-80 см и с шагом 4 см в диапазоне 80-180 см.

Определение элементного состава кернов LKarPC10-1 и LKarPC14-2 было проведено с помощью сканирующего рентгенофлуоресцентного анализа на пучках синхротронного излучения (РФА-СИ) в Сибирском центре синхротронного излучения (ИЯФ СО РАН, Новосибирск). Было произведено определение концентраций элементов: К, Са, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Zn, Ga, As, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, U с пространственным разрешением 200 мкм. Определение элементного состава нижнего горизонта С (кern LKarPC10-2) было проведено в седиментологической лаборатории Университета г. Берген (Норвегия) с помощью кернавого сканера ITRAX (Cox Analytical Systems); сканирование проводилось на дискретных массовых (перемешанных) образцах со средним шагом 2 см в диапазоне 20-140 см и с шагом 4 см в диапазоне 140-200 см.

**Построение мастер-керна.** Датирование осадка и стратиграфический анализ оригинального керна 2010 г. показали потери в верхней части (около 20 см  $\approx$  700 лет). Для прецизионного совмещения двух кернов, полученных в разные годы: LKarPC10-1 и LKarPC14-2, и построения опорного разреза были использованы результаты сканирующего РФА-СИ, полученные для кернов 2010 и 2014 гг. Совмещение профилей сканирования показало явное совпадение маркирующих пиков для всех аналитических данных. Итоговое удлинение верхнего керна с коэффициентом 1,17 и сдвиг относительно нижнего на 225 мм позволили объединить оба керна в один опорный разрез. Это позволило создать единую возрастную модель для верхнего горизонта осадка, охватывающую последние 2000 лет. Впоследствии из модели были исключены турбидитные слои, отмеченные аномально высокими концентрациями терригенных элементов, которые, по всей видимости, образовались за счет резкого вброса аллохтонного вещества. Это обеспечило наиболее точный хронологический контроль дальнейших палеоклиматических интерпретаций.

**Ледниковый сигнал в осадке озера Каракель ранне- и среднеголоценового возраста.** Результаты гранулометрического и геохимического анализов нижней части керна, соответствующей периоду 11200-4200 лет назад, колеблется незначительно, что свидетельствует в пользу того, что источник поступления осадка в озеро в это время не менялся, однако, по всей вероятности, менялись его интенсивность и количество. Статистические параметры распределения осадка – сортировка, асимметрия и эксцесс использованы в качестве индикатора удаленности ледников в водосборе от водоема. Согласно нашим данным, период с 9000-8500 лет назад по 6500-7000 лет назад отмечается значительно меньшими колебаниями указанных параметров и в целом их низкими значениями. Как известно, гранулометрическая сортировка осадка в каждой данной точке области седиментации возрастает пропорционально длине пути, который прошел обломок до момента его осадения (Страхов, 1962). Мы интерпретируем это

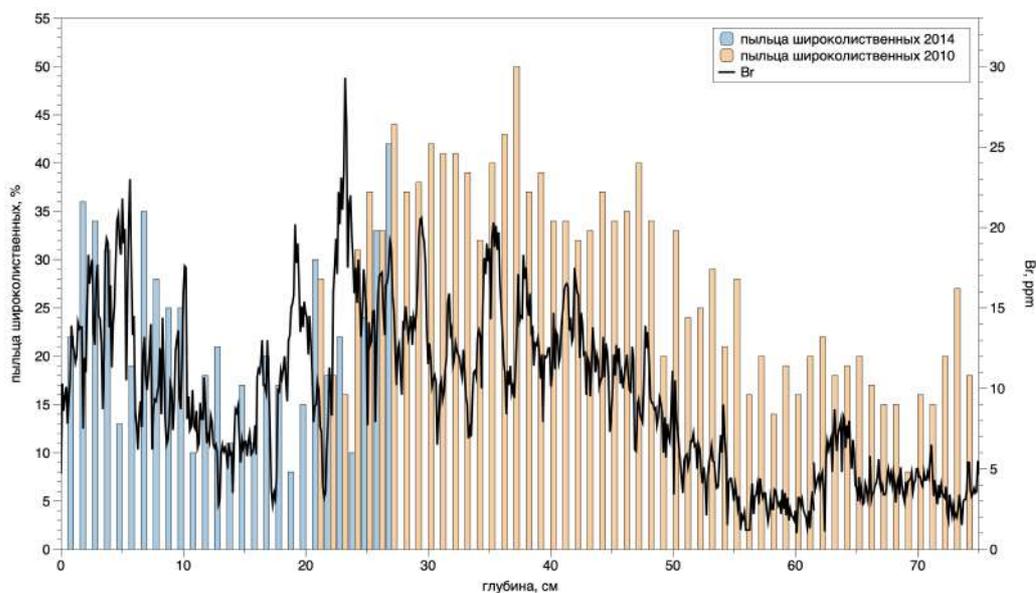
время как вероятный период с возросшей ледниковой активностью на Кавказе. Эти данные отчасти подтверждают полученные ранее данные по колебаниям отдельных ледников Кавказа (Серебрянный и др., 1984) и соответствуют представлениям об активности ледников Альп в раннем и среднем голоцене (Solomina et al., 2015).

**К вопросу о происхождении озера Каракель.** Предпринята попытка прояснить историю формирования и развития озера за счет сочетания стратиграфического анализа керн и петрографического анализа поверхностных образцов, отобранных в районе озера. Принципиальные различия верхней и нижней толщи осадка озера подтверждены с помощью анализов на массовые потери при прокаливании, магнитную восприимчивость, элементный состав осадка. Это также подтверждается возрастной моделью, которая говорит о перерыве в накоплении осадка в период 4200-2200 лет назад. Мы предполагаем, что в период 11200-4200 лет назад озеро Каракель получало прямой сток талых ледниковых вод из долины Теберды. Мы также предполагаем, что в период между 4200 и 2200, соответствующий перерыву в осадконакоплении в озере, имел место обвал или оползень, изолировавший озеро от потоков талых ледниковых вод с юга и сформировавший вал, который читается в рельефе берега озера. Впоследствии, с возобновлением накопления осадка, озеро продолжило эволюцию в качестве реликтового латерального озера с резко возросшей биопродуктивностью, получая основной сток в виде смыва с прилегающих склонов.

Петрографический анализ поверхностных образцов, проведенный А.А. Носовой (ИГЕМ РАН), свидетельствует в пользу того, что в обвальных отложениях преобладает обломочный материал со склона. Это свидетельствует в пользу правомерности указанной гипотезы и вносит ясность в историю накопления осадка в озере.

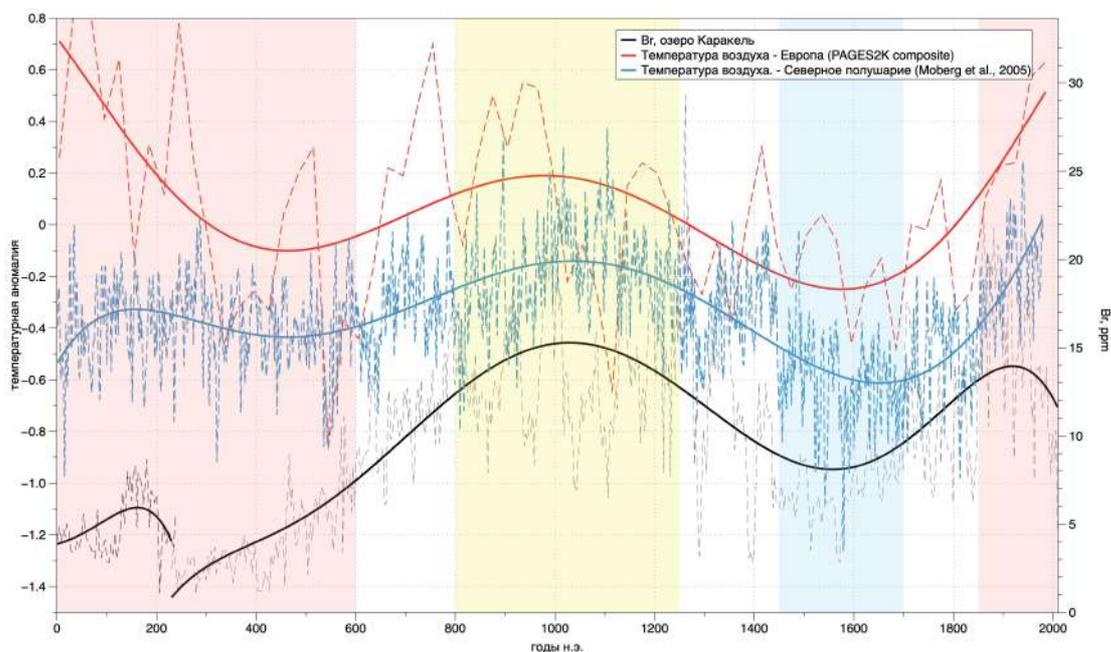
**Палеоклиматическая интерпретация стратиграфических данных осадка оз. Каракель.** Сопоставление изменений содержания пыльцы широколиственных пород на основании палинологического анализа, сделанного для кернов 2010 и 2014 гг. А.А. Чепурной (Чепурная, 2014), и кривой содержания брома в осадках озера Каракель (Рис. 9) показывает явную, хотя и качественную, сходимость этих двух показателей. Подобное совпадение, по всей видимости, не является случайным, так как оба показателя связаны с теплообеспеченностью. Пыльца широколиственных пород ранее использовалась как индикатор теплых обстановок на Кавказе (Серебрянный и др., 1984, Князев, Савинецкий, Гей, 1992, Павлова, Онипченко, 1992). Бром используется в качестве палеоклиматического индикатора относительно недавно, но является перспективным показателем для реконструкций теплообеспеченности и построения температурных реконструкций. Бром образует сильные ковалентные связи с органическими молекулами и может быть использован в качестве индикатора вариаций органического вещества на территории водосбора и/или автохтонной биопродуктивности (Gilfedder et al., 2011). Эти показатели, в свою очередь, зависят от теплообеспеченности, что делает бром подходящим для создания реконструкций температурных обстановок прошлого (Davies et al. 2015). Статистически

значимые связи между концентрацией брома и среднегодовой температурой воздуха отмечены для Озера Донгуз-Орун в Приэльбрусье (см. Главу 3) и Телецкого озера на Алтае (Kalugin et al., 2007).



**Рис. 9.** Изменения концентрации брома и содержания пылицы широколиственных пород (анализы А.А. Чепурной – Чепурная., 2014), по данным изучения осадков озера Каракель (керны 2010 и 2014 гг.)

Далее мы используем непрерывную кривую концентрации брома в осадке, полученную с высоким разрешением, в качестве индикатора изменений условий теплообеспеченности в регионе на протяжении последних 2000 лет. Для выявления основных низкочастотных закономерностей мы сравниваем кривую содержания брома в озере Каракель с реконструкциями температуры воздуха в Европе и северном полушарии. На Рис. 10 представлены данные концентрации брома, нанесенные на временную ось (среднее разрешение – 3,2 года), а также две композитные температурные реконструкции на 2000 лет: PAGES2K Composite (Emile-Geay et al., 2017) – с 30-летним разрешением и Северного полушария (Moberg et al., 2005) – с годичным разрешением. Все три ряда данных также сглажены низкочастотным фильтром – полиномиальным сплайном (жирные линии). Заметно, что содержание брома в озере Каракель также в целом повторяют ход реконструкций температуры для Европы и Северного полушария. Отмечается согласованный период положительных аномалий температур в конце первого – начале второго тысячелетия, соответствующий средневековому климатическому оптимуму, и отрицательных аномалий во второй половине второго тысячелетия, соответствующий малому ледниковому периоду (отмечены желтым и голубым фоном на Рис. 10, соответственно). С другой стороны, отмечаются также и периоды, для которых концентрация брома значительно различается с температурными реконструкциями – это первая половина первого тысячелетия, соответствующая римскому климатическому оптимуму, и современное потепление последнего столетия (отмечены розовым фоном на Рис. 10).

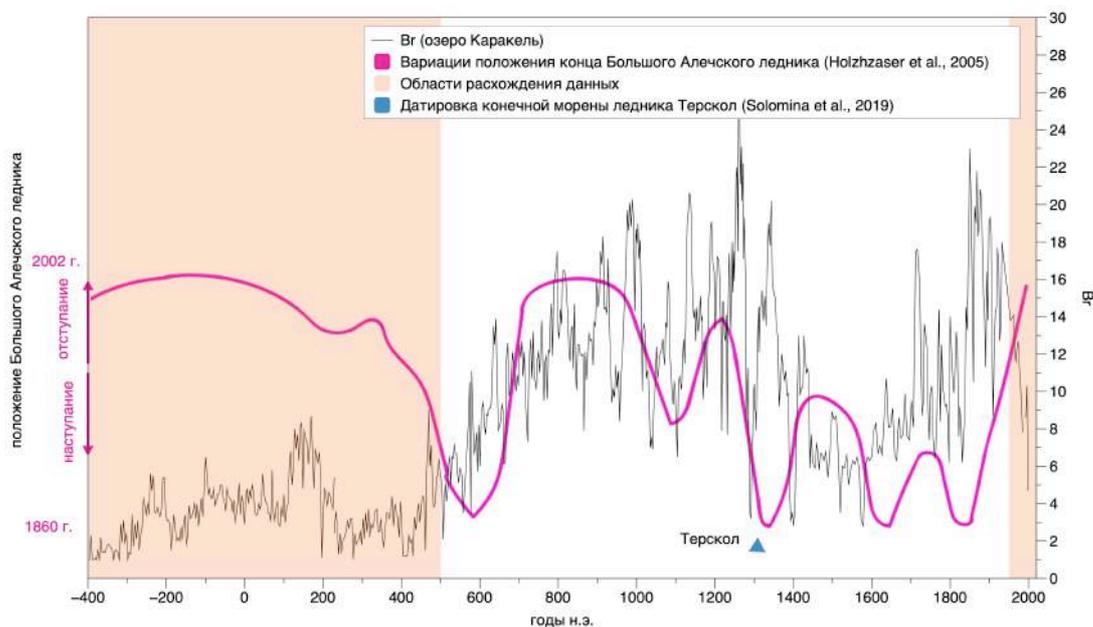


**Рис. 10.** Сравнение кривой содержания брома в осадке озера Каракель и реконструкций температуры воздуха для Европы (проект PAGES2K - Emile-Geay et al., 2017), Северного полушария (Moberg et al., 2005) и их сглаженных полиномиальным сплайном значений.

Особый интерес вызывает сравнение данных озера Каракель с палеоклиматическими кривыми альпийского региона. На Рис. 11 мы приводим сравнение кривой содержания брома в осадке озера Каракель с кривой колебания длины Большого Аалечского ледника (Holzhauser et al., 2005), так как ранее было показано существенное сходство климатических изменений последних столетий для этих двух районов (Solomina et al., 2016). Для последних полутора тысяч лет наблюдается явный согласованный ход двух рядов данных; особенно, если принять во внимание время отклика ледника, составляющее около 50-100 лет (Holzhauser et al., 2005). Выделяется потепление в средневековое время (750-1200 гг.), соответствующее положению Большого Аалечского ледника, близкому к современному (2002 г.), а также общий период похолодания 1300-1850 гг. Характерно, что одна из датировок конечных морен ледника Терскол в Приэльбрусье, недавно полученных с помощью космогенного изотопа  $^{10}\text{Be}$  (Solomina et al., 2019) имеет возраст  $1250 \pm 60$  г. н.э., то есть приблизительно соответствует первой стадии малого ледникового периода для кривой Большого Аалечского ледника (нанесена голубым цветом на Рис. 11).

Для обоих рядов данных, так же, как и при сравнении с температурными реконструкциями для северного полушария и Европы, наблюдается явное расхождение начиная с 400 г до н.э. (начало хронологии по озеру Каракель) до приблизительно 500 г. н.э. В данных по озеру Каракель, которые, как мы полагаем, отражают региональные температурные обстановки, - кривой брома и содержания пыли широколиственных, при этом, весь этот период отмечен пониженными значениями. Между тем, начало первого тысячелетия нашей эры в Европе ознаменовано теплыми условиями, известными как Римский климатический оптимум, который мог длиться, по всей видимости, примерно до 400-450 гг. Есть свидетельства того, что отдельные ледники в Альпах в

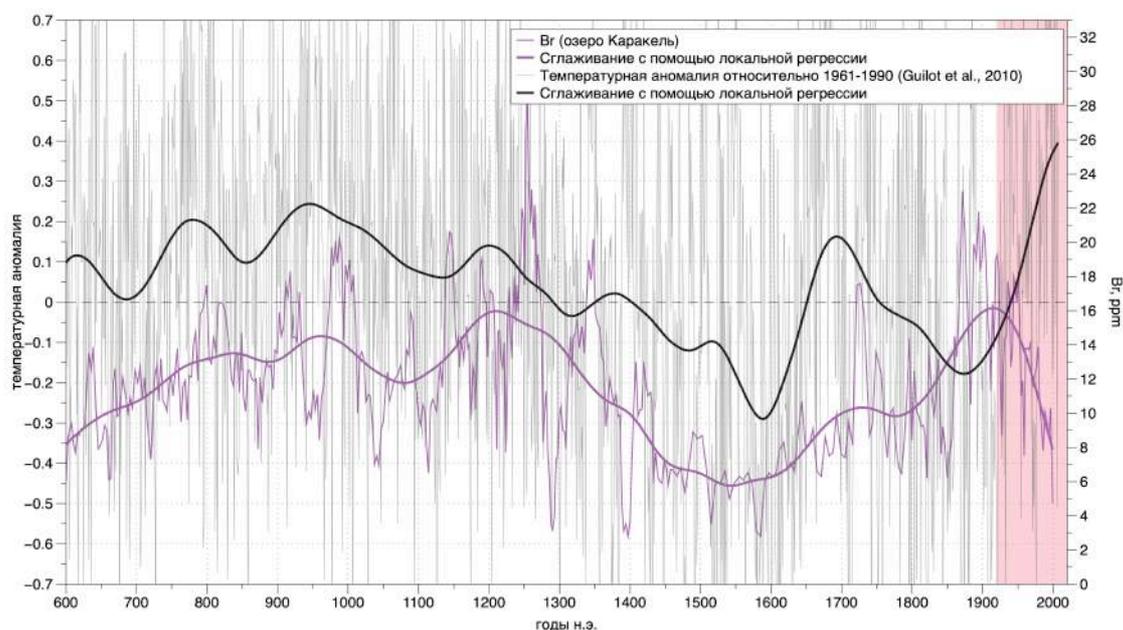
этот период сокращались до положений конца 20 века (Holzhauser et al., 2005; Joerin et al., 2006). Далее следовал достаточно выраженный период похолодания. Этот период расхождения данных озера Каракель и европейский реконструкций отмечен на Рис. 10 и Рис. 11 цветным фоном. Причины подробного расхождения, с одной стороны, могут лежать в недостаточной точности данных анализа озерных осадков. Значения брома для этого периода действительно низки (2-6 ppm), однако согласованный ход кривой брома и пылицы широколиственных свидетельствует в пользу устойчивого общего сигнала в осадке. Любопытно, что эти данные согласуются с новейшими данными датирования конечных морен отдельных ледников Кавказа методом космогенных изотопов. Согласно этим датировкам, выделяется одно или несколько наступаний в районе начала первого тысячелетия н.э. (Ледник Терскол:  $2700\pm 400$  л.н.,  $2100\pm 50$  л.н.; ледник Ирик:  $1820\pm 200$  л.н.,  $1670\pm 200$  л.н.) (Solomina et al., 2019), что примерно соответствует времени Римского оптимума в Европе (возраст конечных морен ледников Терскол и Ирик с ошибками датирования нанесен голубым цветом на Рис. 11). Таким образом, наши данные, согласно которым первая половина первого тысячелетия на Кавказе была значительно холоднее среднего за две тысячи лет, могут действительно отражать региональную климатическую специфику, но это предположение требует дополнительного изучения. На данный момент этот неочевидный в плане палеоклиматической интерпретации период для итоговых выводов мы не используем.



**Рис. 11.** Сопоставление кривой концентрации брома в осадке озера Каракель, кривой колебания размеров Большого Алевского ледника в Альпах (Holzhauser et al., 2005) и датировок конечных морен ледников Терскол и Ирик на Кавказе (Solomina et al., 2019)

20 век также характеризуется несоответствием двух хронологий – альпийской и кавказской (отмечен фоном на Рис. 10-14). Общеизвестен глобальный устойчивый рост температур на протяжении почти всего этого времени. Он хорошо воспроизводится реконструкциями, но не хронологией на основе брома в осадке озера Каракель. По всей

видимости, нарушение в климатическом сигнале брома вызвано антропогенным загрязнением на водосборе или перемешиванием в верхней части осадка. Это также затрудняет калибровку хронологий, построенных на основе свойств донного осадка, относительно довольно коротких рядов инструментальных метеонаблюдений на Кавказе.

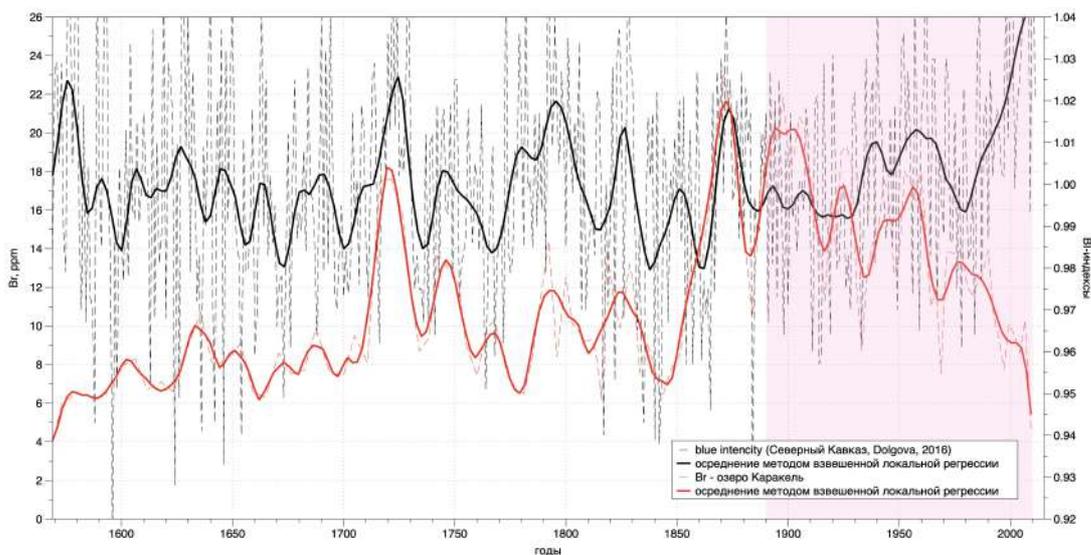


**Рис. 12.** Сопоставление концентрации брома в осадке озера Каракель и реконструкции температуры теплого периода (апрель-сентябрь) Европы ( $42,5^{\circ}\text{с.ш.} \times 42,5^{\circ}\text{в.д.}$ ) (Guilot et al., 2010).

Таким образом, мы можем считать кривую брома озера Каракель достоверной для последних полутора тысяч лет (исключая 20 в). Для этого периода мы используем сравнение с реконструкцией температуры теплого периода (апрель-сентябрь), выполненной для Европы на последние 1400 лет в сетке размером  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  (для Кавказа использован квадрат  $42,5^{\circ}\text{с.ш.} \times 42,5^{\circ}\text{в.д.}$ ) на основе дендрохронологических, документальных и палинологических данных (Guilot et al., 2010). Сравнение двух хронологий и их сглаженных значений (Рис. 12) обнаруживает явный согласованный ход. Более четкое совпадение кривой брома с реконструкцией температуры теплого периода логично, так как температура теплого периода в наибольшей степени связана с собственной биопродуктивностью в озере. Выделяется средневековый оптимум  $\approx 750\text{-}1250$  гг. н.э., а также холодная обстановка малого ледникового периода 1500-1880 гг. н.э.

Для выявления способности кривой концентрации брома в осадке озера Каракель регистрировать короткопериодную изменчивость мы сравниваем наши данные с дендрохронологической реконструкцией температуры воздуха на Кавказе, выполненной по оптической плотности древесины сосны (“blue intensity” – BI) за период 1569-2011 гг. (Dolgova, 2016) (Рис. 13). В работе Е.А. Долговой показана высокая корреляция ( $r = 0.74$ ;  $p < 0.05$ )

показателя VI и температуры летнего сезона (июнь-сентябрь), зарегистрированной на метеостанции Клухорский перевал на период 1951-2011.

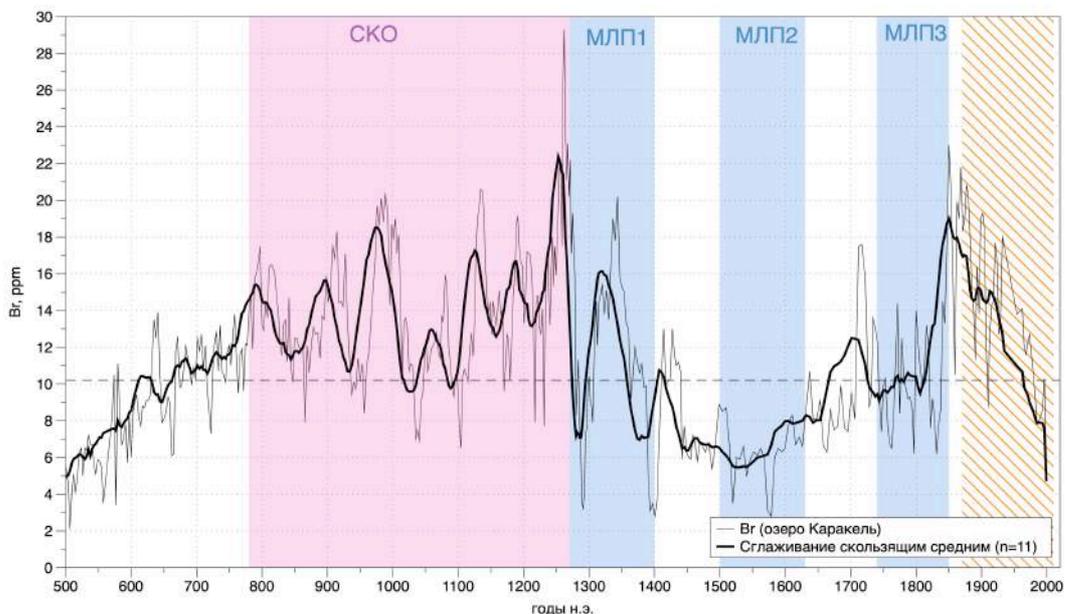


**Рис. 13.** Сравнение кривой концентрации брома в осадке озера Каракель с температурной реконструкцией на основе плотности древесины (Dolgova, 2016)

На Рис. 13 отчетливо видно, что, несмотря на различия в вековых трендах, основные тенденции декадного масштаба убедительно повторяются в обоих рядах. Особенно заметно совпадение для потеплений в районе 1730-х и 1870-х гг., а также в конце 18 века и 1830-х годах. Продолжительный холодный период на Кавказе в 16-17 вв. следует считать второй фазой малого ледникового периода на Кавказе. Это время в целом соответствует минимуму Маундера в солнечной активности (Shindell et al., 2001). Минимумы в обеих хронологиях в значительной степени соотносятся с известными наступаниями ледников Кавказа в 18-19 вв. (Solomina et al., 2016b).

Ряд описанных закономерностей позволяет использовать кривую концентрации брома в осадке озера Каракель в качестве индикатора вариаций теплообеспеченности на Кавказе за последние 1500 лет. В качестве основы для итоговых заключений мы используем кривую концентрации брома и ее сглаженных скользящим средним ( $n = 11$ ) значений (Рис. 14). Это первая непрерывная палеоклиматическая кривая для региона, охватывающая подобный срок. Согласно нашим данным, средневековый оптимум (называемый также Архызским перерывом в оледенении) наблюдался на Кавказе с конца 8 века ( $\approx 770$  г.) до середины 12 века ( $\approx 1250$  г.). В этот период температура воздуха, по всей видимости, могла подниматься до отметок, близких к современным. К сожалению, нарушенный сигнал в хронологии кривой брома на последние 100 лет не позволяет выразить это численно. Период с середины 13 века ( $\approx 1250$  г.) по конец 19 века (1880 г.) в целом отмечен как холодный. Эти даты можно считать границами малого ледникового периода на Кавказе. Внутри выделяются три явных стадии похолодания, разделенные короткими

периодами потеплений: 1 стадия МЛП: ( $\approx 1250-1400$  гг.); 2 стадия МЛП: ( $\approx 1500-1630$  гг.); 3 стадия МЛП: ( $\approx 1750-1880$  гг.)



**Рис. 14.** Кривая концентрации брома в осадке озера Каракель как индикатор вариаций теплообеспеченности на Кавказе. Красным фоном показан теплый период – средневековый климатический оптимум; синим – холодный период – малый ледниковый период; оранжевой штриховкой – недостоверный период 20 века; прерывистая линия – среднее значение концентрации брома за 1500 лет.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях глобального роста температур детальное понимание климата недавнего прошлого становится все более актуальной задачей. Настоящая работа посвящена исследованию палеоклиматического потенциала озерных осадков – уникального природного архива, способного непрерывно регистрировать и хранить в течение длительного времени различные палеоклиматические данные. Работы, основанные на изучении свойств донного осадка озер, проводились по всему миру и позволили в значительной степени прояснить историю изменений климата и условий среды на планете.

Проведенные в рамках настоящей работы исследования во многом имеют методическую ценность. Ряд работ – от разработки сети объектов палеолимнологических исследований и отбора первых в истории упомянутых озер кернов донных осадков до применения комплекса аналитических методов и палеоклиматических интерпретаций – был проделан впервые. Это позволило сформировать понимание необходимых действий на каждом из этапов цепочки «озерный осадок – климат прошлого».

Западный и Центральный Кавказ – регион, на котором фокусируется настоящая работа, – отмечается недостаточной палеоклиматической изученностью. Непрерывные количественные реконструкции для региона единичны и охватывают относительно небольшие промежутки

времени. В рамках палеолимнологических исследований Института географии РАН была исследована целая сеть озер Западного и Центрального Кавказа. Два из них – озера Каракель и Донгуз-Орун вошли в настоящую работу как наиболее разносторонние примеры применения метода.

Осадок озера Донгуз-Орун является примером работы с данными высокого разрешения и открывает дорогу к созданию количественных высокоразрешающих палеореконструкций. Впервые на Кавказе обнаружены и подтверждены с помощью геохимического анализа высокого разрешения варвы, то есть годично-стратифицированные осадки приледниковых озер. Обнаружены статистически значимые связи между свойствами современного осадка озера Донгуз-Орун и температурой воздуха и количеством атмосферных осадков, а также локальными древесно-кольцевыми сериями.

Осадок озера Каракель охватывает практически весь голоцен, что обеспечило ряд важных и различных по своему характеру выводов. Построена подробная непрерывная кривая вариаций условий теплообеспеченности на Кавказе за последние 1500 лет. Это позволило уточнить временные рамки основных теплых и холодных периодов, таких как средневековый оптимум и малый ледниковый период, включая отдельные стадии. Выявлен период вероятного усиления активности ледников Западного Кавказа в раннем и среднем голоцене. Прояснена история формирования и накопления осадка в озере Каракель.

Все описанное указывает на то, что донные осадки озер Западного и Центрального Кавказа являются ценным источником палеоклиматической информации, который может и должен быть использован в будущем. В дальнейшем мы планируем получение новых, более длинных, кернов озерных осадков, создание реконструкций высоты границы отдельных ледников Кавказа, создание реконструкции температуры воздуха в регионе на 2000 лет, совмещение палеолимнологических данных с данными других палеоархивов (древесных колец, ледников кернов) с целью создания первых множественных (multi-proxy) реконструкций. Исследования, проведенные в рамках настоящей работы, должны стать фундаментом для дальнейших палеолимнологических исследований с целью создания детальных непрерывных количественных реконструкций параметров климата и условий среды на Кавказе.

### **Список опубликованных работ по теме диссертации**

*Публикации в журналах, рекомендованных ВАК*

1. **Александрин М.Ю.**, Дарьин А.В., Грачев А.М., Соломина О.Н. (2019). Динамика региональных климатических условий за последние 2000 лет по данным литолого-геохимических исследований донных осадков озера Каракель (Западный Кавказ) //Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2019. – №. 1. – С. 73-85.

2. Дарьин А. В., **Александрин М. Ю.**, Грачев А. М., Соломина О. Н. Построение временных рядов литолого-геохимических данных в разрезе донных осадков озера Каракель по данным сканирующего МИКРО-РФА на пучках синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН //Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2019. – Т. 83. – №. 2. – С. 239-242.

3. Sapelko, T. V., Boynagryan, V. R., Naumenko, M. A., Sevastyanov, D. V., Gabrielyan, I. G., Piloyan, A. S., Margaryan L.A., **Aleksandrin M.Y.**, Terekhov, A. V. (First Multy-Proxy Studies of High-Mountain Lakes in Armenia: Preliminary Results //Geography, Environment, Sustainability. – 2019. – Т. 12. – №. 4. – С. 272-284.

4. **Alexandrin MY**, Darin AV, Kalugin IA, Dolgova EA, Grachev AM and Solomina ON Annual sedimentary record from Lake Donguz-Orun (Central Caucasus) constrained by high resolution SR-XRF analysis and its potential for climate reconstructions //Frontiers in Earth Science. – 2018. – Т. 6. – С. 158

5. Solomina O., Bushueva I., Dolgova E., Jomelli V., **Alexandrin M.**, Mikhalenko V., Matskovsky V. Glacier variations in the Northern Caucasus compared to climatic reconstructions over the past millennium //Global and planetary change. – 2016. – Т. 140. – С. 28-58.

6. **Александрин М.Ю.** Отложения приледниковых озёр – основа для создания непрерывных летописей истории голоценового оледенения // Лед и снег, – 2015. – Т. 55. – №. 1. – С. 89-102.

7. Дарьин А.В., **Александрин М.Ю.**, Калугин И.А., Соломина О.Н. Связь метеорологических данных с геохимическими характеристиками современных донных осадков оз. Донгуз-Орун, Кавказ. Доклады Академии наук, 2015. – Т. 463. – №. 5. – С. 602-602.

8. Соломина, О. Н., Калугин, И. А., **Александрин, М. Ю.**, Бушуева, И. С., Дарин, А. В., Долгова, Е. А., Жомелли В., Иванов М.Н., Мацковский В.В., Овчинников Д.В., Павлова И.О., Разумовский Л.В., Чепурная А.А. Бурение осадков озера Каракель (долина р. Теберды) и перспективы реконструкции истории оледенения и климата голоцена на Кавказе // Лёд и снег. – 2013. – Т. 53. – №. 2. – С. 102-111.

#### *Другие публикации*

9. М. **Alexandrin**, A. Grachev, O. Solomina, and A. Darin. Bottom sediments of the Lake Donguz-Orun (Central Caucasus) as a chronicle of the climate change in the region // PAGES OSM05, Zaragoza, 2017

10. Дарьин, А. В., Калугин, И. А., Максимова, Н. В., Маркович, Т. И., **Александрин, М. Ю.**, Соломина, О. Н., ... & Сороколетов, Д. А. Исследование сезонного геохимического сигнала в годовых слоях донных осадков оз. Донгуз-орун методом сканирующего РФА с использованием микрокапиллярной рентгеновской оптики. Книга тезисов, 2015. – С. 75.

11. Соломина О.Н., Калугин И.А., Дарьин А.В., Чепурная А.А., **Александрин М.Ю.**, Кудерина Т.М. Использование геохимического и пыльцевого анализов отложений оз. Каракель для реконструкции климатических изменений в долине р. Теберда (Северный Кавказ) в позднем голоцене: возможности и ограничения // Вопросы географии. Сб. 137: Горные исследования. М.: Издательский дом «Кодекс», 2014. С. 234-266.

12. Mikhail **Alexandrin**, Olga Solomina, Ivan Kalugin, Andrey Darin, Atle Nesje. Sediment coring of the proglacial lake Donguz-Orun (Northern Caucasus) CL2.13. EGU 2014. European Geophysical Union, Vienna, April 2014

13. Darin A.V., Kalugin I.A., Maksimova N.V., Markovich T.I., **Aleksandrin M.Yu.**, Solomina O.N., Rakshun Ya.V., Darin F.A., Sorokoletov D.A. Model of formation seasonal geochemical signal in lake Donguz-Orun (Caucasus) annually laminated sediments according to micro scanning XRFA using focuses x-ray optics. International Conference Paleolimnology of Northern Eurasia. Petrozavodsk, Russia. 21–25 September 2014

14. М.Ю. **Александрин**. Бурение озерных осадков озер Кавказа с целью реконструкции колебаний ледников и истории климата региона // Динамика современных экосистем в голоцене. Казань, 2013

15. Solomina O., Kalugin I., Darin A., Chepurnaya A., **Alexandrin M.** Late Holocene climate history recorded in Karakel lake sediments, Central Caucasus // CL1.9. EGU 2013. European Geophysical Union, Vienna, April 2013.

16. Solomina O., **Alexandrin M.** and Matskovsky V. Global and regional patterns in the Holocene glacier fluctuations records // PAGES OSM07, Goa, 2013