

ЭВОЛЮЦИЯ ПРИРОДНЫХ  
СИСТЕМ

УДК 551.583.7

ДИНАМИКА РЕГИОНАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ  
ЗА ПОСЛЕДНИЕ 2000 ЛЕТ ПО ДАННЫМ  
ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДОННЫХ  
ОСАДКОВ ОЗЕРА КАРАКЕЛЬ (ЗАПАДНЫЙ КАВКАЗ)

© 2019 г. М. Ю. Александрин<sup>1</sup>; \*, А. В. Дарьин<sup>2</sup>, А. М. Грачев<sup>1</sup>, О. Н. Соломина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева  
СО РАН, Новосибирск, Россия

\*e-mail: alexandrin@igras.ru

Поступила в редакцию 16.08.2018 г.; после доработки 11.09.2018 г.; принята в печать 21.09.2018 г.

Опорный разрез донных осадков оз. Каракель (Кавказ) построен по кернам, полученным в ходе экспедиционных работ 2010 и 2014 гг., с учетом радиоуглеродных датировок и данных аналитической микростратиграфии. С использованием методики сканирующего микро-РФА, твердые препараты донных осадков были сканированы с шагом 1 мм с одновременным определением содержания более 25 породообразующих и микроэлементов. При построении мастер-керны учитывались профили изменения содержаний терригенных элементов. Это позволило точно совместить два керна и удалить из разреза интервалы осадка, отвечающие “одномоментным” событиям – вбросам терригенного материала. Сравнение инструментальных данных региональных метеонаблюдений в интервале 1927–2010 гг. с временными рядами геохимических индикаторов показало наличие устойчивой связи состава донных осадков со средними 11-тилетними температурами. Аппроксимация трансферных функций на глубину опробования керна позволила построить палеоклиматическую реконструкцию региональной температуры для двух последних тысячелетий с временным разрешением 5–10 лет.

**Ключевые слова:** палеоклимат, микро-РФА, аналитическая микростратиграфия, Кавказ, донные осадки, озера, поздний голоцен.

DOI: 10.31857/S2587-55662019173-85

**Введение.** В эпоху глобальных изменений климата детальные региональные палеоклиматические реконструкции являются принципиально важными для понимания антропогенного вклада и прогнозирования возможных климатических изменений.

Климатическая история Кавказа – огромной горной страны с разнообразными природными условиями – остается изученной лишь в общих чертах. Имеющиеся реконструкции в основном носят качественный характер [6, 10, 18, 23] или охватывают незначительный временной интервал [3, 16].

Важную роль в построении реконструкций занимают озерные донные отложения, играющие роль палеоархивов как биологических, так и литолого-геохимических индикаторов климата. На протяжении последних десятилетий озерные осадки по всему миру стали одним из наиболее полных и универсальных источников палеоклиматической информации. Современные высокопроизводительные аналитические методы (микро-

РФА) с высоким пространственным разрешением позволили климатическим реконструкциям выйти на новый уровень. Озерные осадки способны обеспечить детальные непрерывные количественные и качественные реконструкции целого ряда параметров изменчивости среды. На Западном и Центральном Кавказе исследованием современных озерных донных осадков занимаются сотрудники отдела гляциологии Института географии РАН (Москва) в сотрудничестве с коллегами из Института геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск). Озеро Каракель, рассматриваемое в настоящей работе, стало пионерным объектом. Другим важным объектом для палеолимнологических исследований стало озеро Донгуз-Орун в Приэльбрусье [3]. В настоящий момент ведется работа по анализу кернов, полученных в других озерах Кавказа в период 2014–2017 гг.

**Постановка задачи исследований.** Впервые отбор донного осадка озера Каракель был произведен в 2010 г. [11]. Впоследствии были установлены важные взаимосвязи различных параметров

осадка — в частности, была выявлена устойчивая связь содержания пыли широколиственных видов с концентрацией брома в осадке — двух параметров, связанных с теплообеспеченностью района [12]. Дальнейшие исследования, однако, позволили выявить неточности существующей хронологии за счет получения новых кернов донного осадка в 2014 г. Настоящая работа ставит своей целью создание объединенной мастер-хронологии двух последних тысячелетий и восстановление тенденций климатической изменчивости в регионе на основе исследований состава донного осадка оз. Каракель.

**Методика исследований. Отбор кернов.** Озеро Каракель располагается в пределах западной высокогорной провинции Большого Кавказа, в долине р. Теберда, берущей свое начало на склонах Главного Кавказского хребта. В этом районе долина реки простирается преимущественно с юго-запада на северо-восток и имеет ширину около 1000–1200 м. Озеро расположено на абсолютной высоте 1335 м, имеет продолговатую форму и вытянуто в направлении простирающейся долины. Размеры озера составляют около 140 × 280 м, глубина на основной площади озера колеблется незначительно и составляет в среднем 9 м (по состоянию на 2017 г.). Озеро бессточное, однако, часть воды, вероятно, фильтруется сквозь рыхлую толщу подстилающей его морены. Со склона, особенно весной, в озеро стекают ручьи и сходят небольшие сели. На склоне над озером прослеживаются ложбины двух ручьев, слившийся которых в нижней части образуют отлившийся конус выноса. Основное питание озера — за счет атмосферных осадков и снеготаяния, расход — путем испарения и фильтрации. Вероятно, в питании озера существенна роль подземной составляющей. Зимой озеро покрывается льдом лишь в отдельные годы.

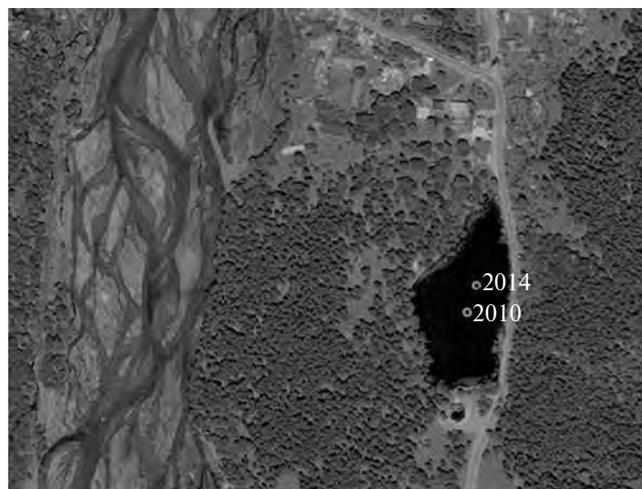
Впервые керновое бурение донного осадка оз. Каракель было произведено нами в августе 2010 г. Ему предшествовал пробный отбор осадка торфяным буром. Было показано, что на дне озера имеется достаточно мощный слой рыхлых отложений, причем отдельные слои различаются по своим минералогическим и физическим характеристикам. Батиметрическая съемка, предшествовавшая бурению, установила в среднем равномерную глубину на всей площади озера — 9–9.5 м. Керновое бурение производилось модифицированным поршневым буром ударного типа конструкции Атле Несье [21]. 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, второй — от ~350–400 мм до 1800–1850 мм). Повторное бурение озера проводилось в августе 2014 г. также сотрудниками полевой экспедиции Отдела гляциологии Института географии. В качестве платформы был использован надувной катамаран для сплава. Получены два керна: Каг-14-1, мощность около 600 мм предположительно от границы вода–осадок (бурение без поршня); Каг-14-2, около 700 мм на глубину максимального проникновения (бурение с поршнем). На рис. 1 представлены места отбора кернов 2010 и 2014 гг.

**Стратиграфия.** Основываясь на стратиграфическом анализе двух кернов оз. Каракель 2010 г., можно проследить три характерных горизонта (рис. 2). Первый (горизонт А) до глубины 520–540 мм представлен желеобразным тонкослоистым сапропелем; второй (горизонт В) до глубины 570 мм — темно-серой, с зеленоватым оттенком, тонкослоистой и сильно обогащенной органическим веществом гиттией; третий (горизонт С) (с глубины 580 мм до конца керна 1810 мм) — голубовато-серой глиной, иногда с коричневыми прослоями, мощностью 1–2 мм. Вниз по разрезу плотность глин возрастает. Керн 2014 г. имеет длину 62 см и сложен темно-коричневым сапропелем. На глубине 20–21 см расположен характерный белесый прослой. Примечательно, что в оригинальном керне 2010 г. на глубине около 3 см присутствует очень похожий белесый прослой. Стратиграфический анализ керна 2010 г., а также имеющиеся радиуглеродные датировки с уверенностью говорят о двух принципиально разных режимах осадконакопления на протяжении последних двух тысяч лет и в раннем и среднем голоцене в период с 11 до 4 тыс. лет назад. Настоящая работа ставит своей целью детальное рассмотрение верхней части керна 2010 и керна 2014 гг., соответствующих последним 2000 лет.

**Микро-РФА.** Первые опыты применения сканирующего рентгенофлуоресцентного микроанализа с возбуждением синхротронным излучением для исследования распределения элементов в геологических образцах показали большую перспективность метода [14], в том числе для изучения морских осадочных последовательностей [15]. Впоследствии анализ широко применялся для исследования как морских, так и озерных донных осадков, и в настоящее время все методики проведения измерений аттестованы [1, 2].

Подготовка образцов для измерений проводилась по отработанной методике с изготовлением плоскопараллельных пластинок длиной 170 мм, шириной 15 мм и толщиной 2 мм из твердого препарата, пропитанного эпоксидной смолой [1].



**Рис. 1.** Русло реки Теберда и озеро Каракель с участками отбора кернов 2010 и 2014 гг.

Измерения образцов проводились на станции “Элементный анализ” ЦКП “Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения” [2] с помощью монохроматического пучка синхротронного излучения с энергией 21 кэВ. Ширина пучка (поперек образца) составляла 10 мм, высота пучка (вдоль образца) – 1 мм. Образец перемещался вертикально с шагом, совпадающим с высотой пучка. Время измерения в точке составляло от 10 до 25 сек, в зависимости от загрузки спектрометрического тракта. Одновременно определялись содержания 25 порообразующих и микроэлементов: Cl, S, K,

Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo – по K сериям, U и Th – по L сериям. Кроме этого проводилось измерение отношения интенсивностей упруго-неупругорассеянного на образце излучения, как потенциально климатически обусловленного параметра [4].

Все регистрируемые величины были геометрически привязаны к положению на шкале глубины керна в миллиметрах от верха (граница вода–осадок). Верх керна датировался годом отбора и служил началом отсчета при построении временных рядов по актуальной модели: глубина–возраст осадка.

#### **Датировки. Скорость осадконакопления.**

Датирование донного осадка озера происходило в несколько этапов. В ходе первого этапа были получены две датировки методом AMS (радиоуглеродная лаборатория г. Познань, Польша) из верхнего керна 2010 г. (30–31 и 52 см) и одна из базального горизонта нижнего керна 2010 г. (глубина 143 см по нижнему керну или 180.5 см от границы вода–осадок). Калиброванный возраст составил соответственно 1528–1377, 2278–2153 и 11348–11063 лет назад (табл. 1). Первые датировки подтвердили голоценовый возраст осадков горизонта С и уточнили минимальный возраст каракельской морены в долине р. Теберда [11, 12].

Впоследствии был сделан еще ряд радиоуглеродных датировок для керна 2010 и 2014 гг. Все полученные датировки представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Результаты датирования кернов 2010 и 2014 гг.

№	Керн	Глубина сводная, см	Возраст $^{14}\text{C}$ , BP ( $1\sigma$ )/pMC, %	Материал
IGAN-5497	Каракель 2014	7–8	100.740±0.292	массовый образец (ТОС)
IGAN-5496	Каракель 2014	13.5–14.5	340±30	массовый образец (ТОС)
IGAN-5493	Каракель 2014	13.5–14.5	725±20	Древесный макроостаток
IGAN-5495	Каракель 2014	18–19	640±20	массовый образец (ТОС)
IGAN-5494	Каракель 2014	21–22	640±20	массовый образец (ТОС)
IGAN-5333	Каракель 2010	28.5–29	880±20	массовый образец (ТОС)
IGAN-5332	Каракель 2010	34.5–35	1030±20	массовый образец (ТОС)
IGAN-5331	Каракель 2010	42.5–43	1235±20	массовый образец (ТОС)
Poz-42587	Каракель 2010	52.5–53.5	1550±30	массовый образец (ТОС)
Poz-42588	Каракель 2010	74–75	2235±35	массовый образец (ТОС)

### Результаты. Построение мастер-керн.

Отбор образцов донных осадков с помощью поршневого озерного бура имеет свою специфику. Для того, чтобы поршень начал продвигаться в пробоотборной трубке, осадок должен быть достаточно плотным. В случае, когда верхняя часть осадка находится в полужидком состоянии, возможны потери части керн. Изначальная работа над керном 2010 г. не предполагала значительных потерь верха, а ограниченное количество радиоуглеродных датировок не позволило точно установить это на первом этапе работы. Таким образом, хронология, описанная в [11] опиралась на предположение о том, что верх керн датируется 2010 г.

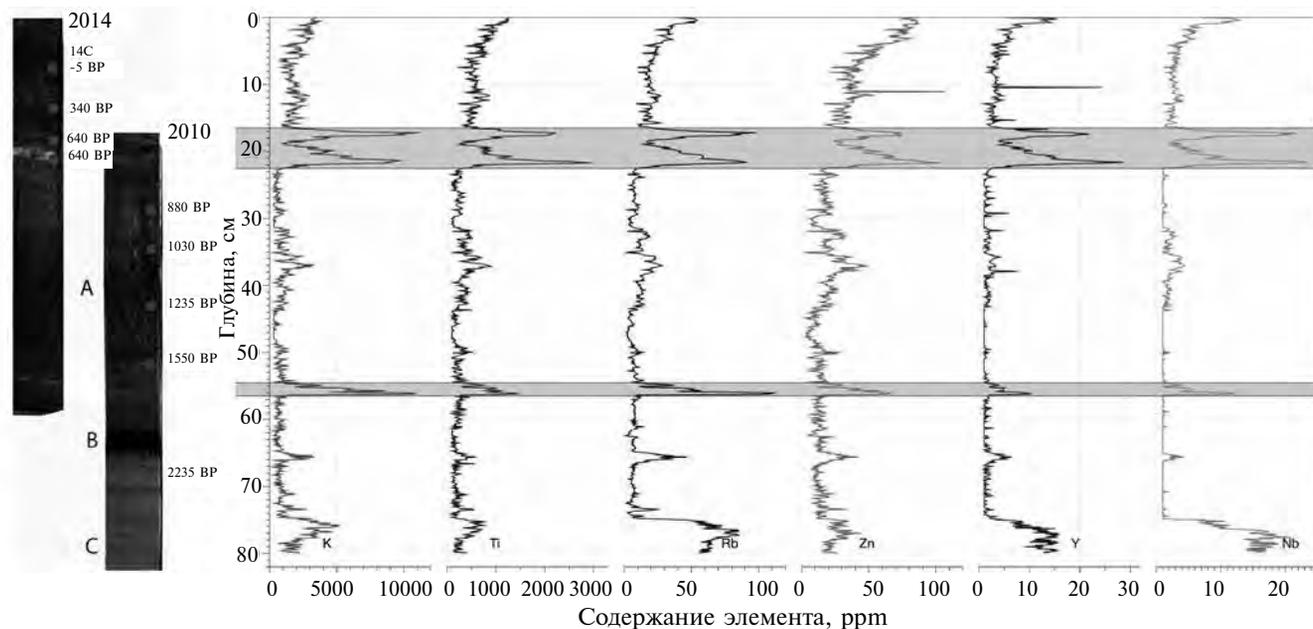
Впоследствии, новые датировки, полученные для верхней части керн 2010 г., поставили под сомнение существующую возрастную модель и послужили предпосылками к предположению о том, что верхняя часть керн 2010 г. была потеряна в процессе отбора. Бурение 2014 г. производилось без поршня, что исключало вероятность потери верхней слабо консолидированной части осадка. Сравнение двух кернов показало, что на глубине 20–30 мм в керне 2010 г. и на глубине 200–220 мм в керне 2014 г. наблюдается характерный белесый линзовидный прослой, по всей видимости, аллохтонного происхождения (см. рис. 2).

Для точного совмещения кернов и построения опорного разреза были использованы ре-

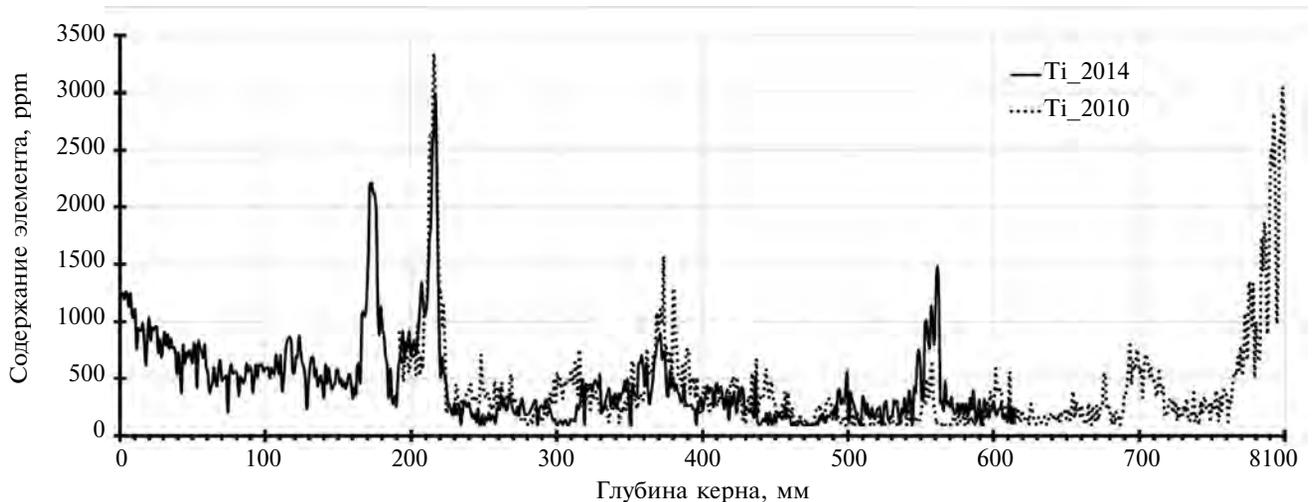
зультаты сканирующего микро-РФА, полученные для разрезов 2010 и 2014 гг. Совмещение профилей сканирования показало совпадение маркирующих пиков для всех аналитических данных. На рис. 3 представлен профиль Ti в совмещенном мастер-керне осадков озера.

Итоговое удлинение верхнего керн с коэффициентом 1.17 и сдвиг относительно нижнего на 225 мм позволили объединить оба керн в один опорный разрез. Изменение размеров верхнего керн связано с тем, что отбор проводился в разных точках озера, где линейные скорости осадконакопления немного различаются. Но при этом текстура и состав осадков в керн совпадают, а их изменения отражают реакцию системы седиментации озера в целом на изменения параметров внешней среды.

**Датировка мастер-керн.** Создание возрастной модели было произведено с помощью алгоритма *Bacon* программной среды R (<http://chrono.qub.ac.uk/blauw/bacon.html>). *Bacon* использует Байесовскую вероятность для того, чтобы разбить толщу осадка на множество мелких секций, для каждой из которых дискретно определяется скорость осадконакопления. Для построения возрастной модели с помощью *Bacon* используется калибровочная кривая IntCal13 [22]. Одна из датировок (датировался макроостаток, тогда как во всех остальных случаях – массовые образцы осадка – *total organic carbon* (TOC)) была исключена из построения



**Рис. 2.** Фотографии кернов 2010 и 2014 гг. Точками указаны участки отбора материала для датирования и соответствующий радиоуглеродный возраст. Представлены кривые концентраций элементов, обсуждаемых в настоящей работе. Полупрозрачными горизонтальными областями отмечены участки резкого роста концентраций терригенных элементов, соответствующие светлым прослоям в керн.

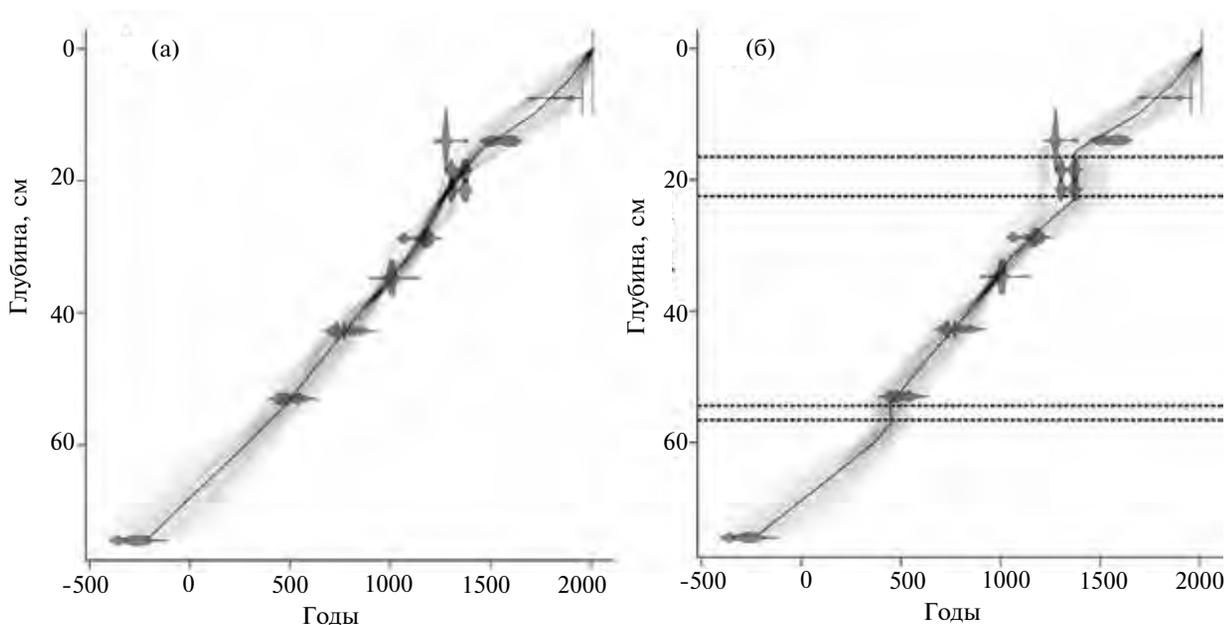


**Рис. 3.** Совмещение профилей содержания Ti в кернах Каракель 2010 и Каракель 2014 использовано для учета недостающего верха в керне Каракель 2010 и построения итогового мастер-керна донных осадков озера Каракель.

модели. Хотя, как правило, датировки по макроостаткам считаются более точными, в нашем случае оказалось, что именно эта датировка выбивается из общего тренда. Это может быть связано с разными причинами, в том числе и с переотложением материала, взятого для датирования. Отклонение этой датировки от результирующей взвешенной небольшое и радикально не меняет оценку скорости осадконакопления, что позволяет использовать отношение глубины и возраста осадка любого участка керна (рис. 4).

Данные С-14 подтверждают правильность построения мастер-керна и дают возможность построить простую линейную модель: глубина керна – возраст осадка с оценкой средней линейной скорости осадконакопления величиной равной примерно 0.33 мм/год.

**Поиск климатических индикаторов.** Принятая возрастная модель позволяет датировать верхние слои осадка (в предположении, что верх соответствует году отбора – 2014 г.) и провести сравнение данных аналитической



**Рис. 4.** Временные модели мастер-керна донных осадков озера Каракель: (а): модель 1 – без учета турбидитных слоев; (б): модель 2 – с учетом турбидитных слоев.

микростратиграфии (профили содержаний элементов) с данными региональных метеонаблюдений – метеостанция Теберда (временной ряд 1927–2010 гг.) ([www.meteo.ru](http://www.meteo.ru)).

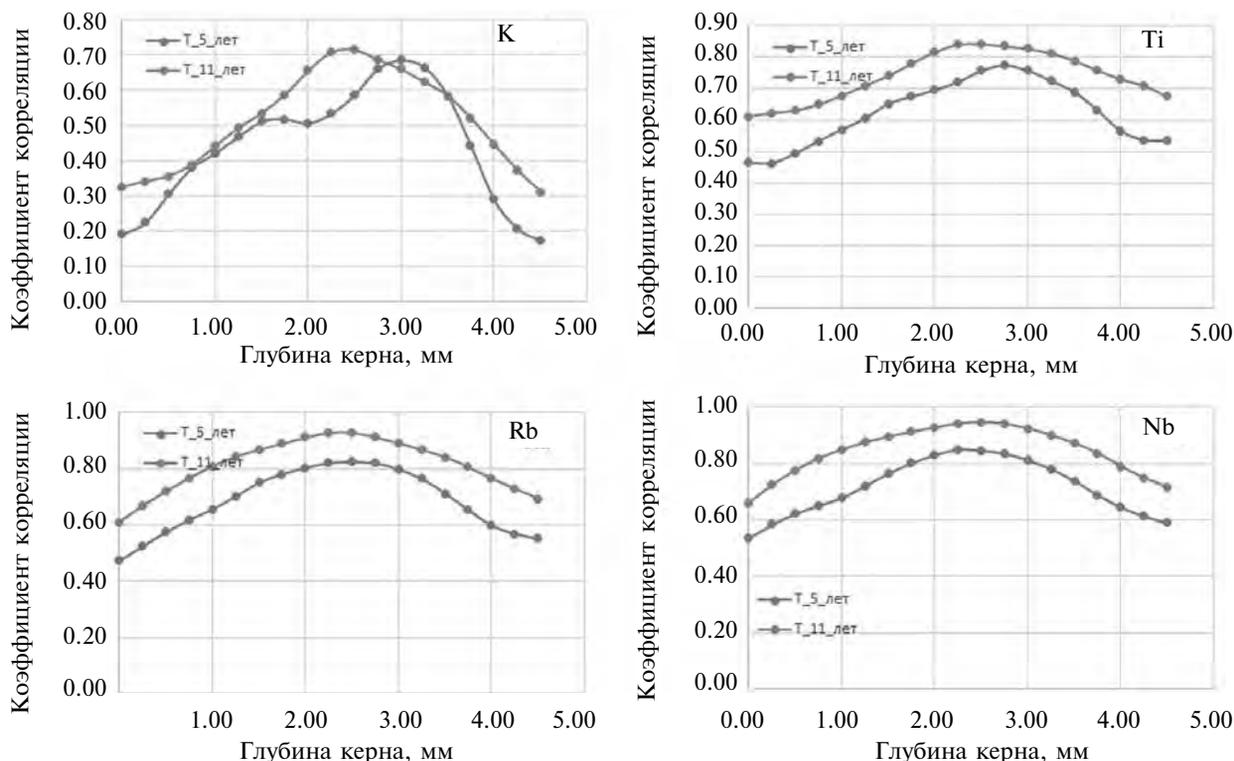
Шаг опробования при проведении сканирующего анализа составлял величину 1.1 мм, что при средней скорости осадконакопления 0.33 мм/год соответствует 3.6 года. Это определяет минимальную величину временного разрешения полученных результатов. Однако, поскольку осадок не имеет следов ежегодной стратификации, то имеется и усреднение состава осадка в процессе осаждения. Поэтому можно предполагать, что реальное временное разрешение аналитических данных составляет величину более 5 лет. Поэтому для сравнения метеоданных с геохимическими индикаторами использовали средние 5-ти и 11-тилетние величины температуры и количества осадков.

Двигая временную шкалу по глубине керна, находим, что корреляция метеоданных с содержанием элементов достигает максимума при положении начального года сравнения (2010 г.) на глубине 2–3 мм. Можно предположить, что линейная скорость осадконакопления для верхних слоев выше средней и оценивается величиной

порядка 1 мм/год, что и обуславливает положение 2010 г. относительно верха керна. На рис. 5 представлен график изменения коэффициентов корреляции для 5-ти и 11-тилетних температур с рядом геохимических индикаторов.

Важным фактором является наличие высоких (до +0.95, значимых при  $p < 0.01$ ) коэффициентов корреляции для сопоставляемых временных рядов длиной более 80 точек (1927–2010 гг.), что свидетельствует о наличии устойчивых и значимых связей между наблюдаемыми величинами (метеопараметрами и составом донного осадка на этом же временном интервале). В табл. 2 представлены данные о наборе породообразующих и микроэлементов, имеющих высокую корреляцию с температурой и атмосферными осадками. Установленная связь дает основания для расчета трансферных функций и построения палеореконовструкций по данным аналитической микростратиграфии.

*Определение трансферных функций.* Набор элементов, имеющих максимальную корреляцию с 5-ти и 11-тилетними температурами, был использован для расчета уравнений регрессии количественной связи состава донного осадка и реконструируемого метеопараметра. В данном



**Рис. 5.** Изменение коэффициентов корреляции для 5-ти и 11-тилетних температур с геохимическими индикаторами в зависимости от положения начала года сравнения (2010 г.) на шкале глубины керна.

случае использован набор простых трансферных функций для каждого элемента в отдельности. Пример расчета для Rb и Ti представлен на рис. 6.

**Подготовка литолого-геохимических данных для построения реконструкций.** Перед аппроксимацией полученные трансферные функции на всю глубину опробования керна необходимо провести дополнительный анализ временных рядов литолого-геохимических данных, используемых для реконструкций. Это связано с тем, что в случае значительных отличий

в содержаниях элементов на интервале обучения от остальных участков керна, построенные реконструкции метеопараметров не будут отвечать не только количественным, но и качественным оценкам. Нами не выработаны строгие оценки допустимых отклонений, но предыдущий опыт показывает, что при вариации содержаний элементов по глубине керна более чем на 50% от верхнего интервала обучения, необходимо провести дополнительное исследование для оценки изменения модели осадконакопления в прошлом.

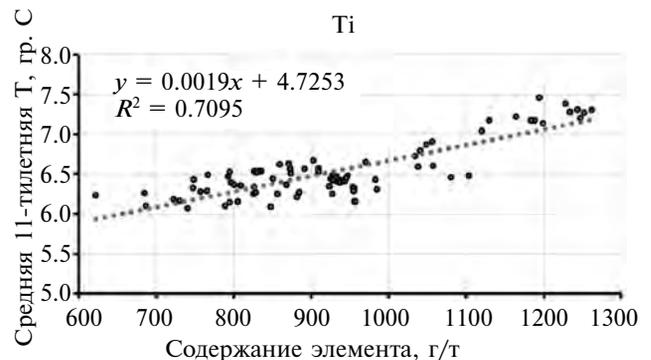
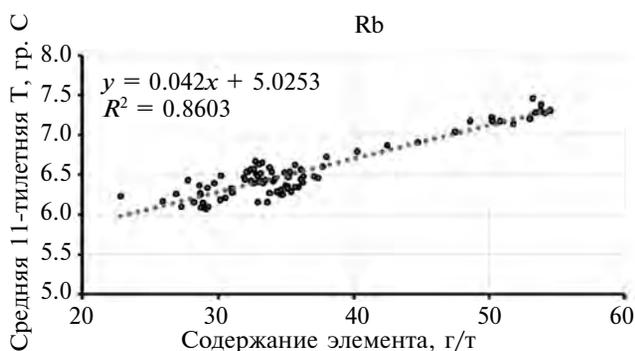
**Таблица 2.** Набор породообразующих и микроэлементов, имеющих максимальную корреляцию с метеоданными. T – среднегодовая температура, Pг – годовое количество осадков

Параметр	K	Ti	Zn	Rb	Y	Nb
5-ти лет T	0.69	0.78	0.74	0.82	0.80	0.85
11-ти лет T	0.72	0.84	0.76	0.93	0.89	0.95
5-ти лет Pг	0.51	0.63	0.72	0.75	0.77	0.72
11-ти лет Pг	0.48	0.73	0.74	0.83	0.83	0.74

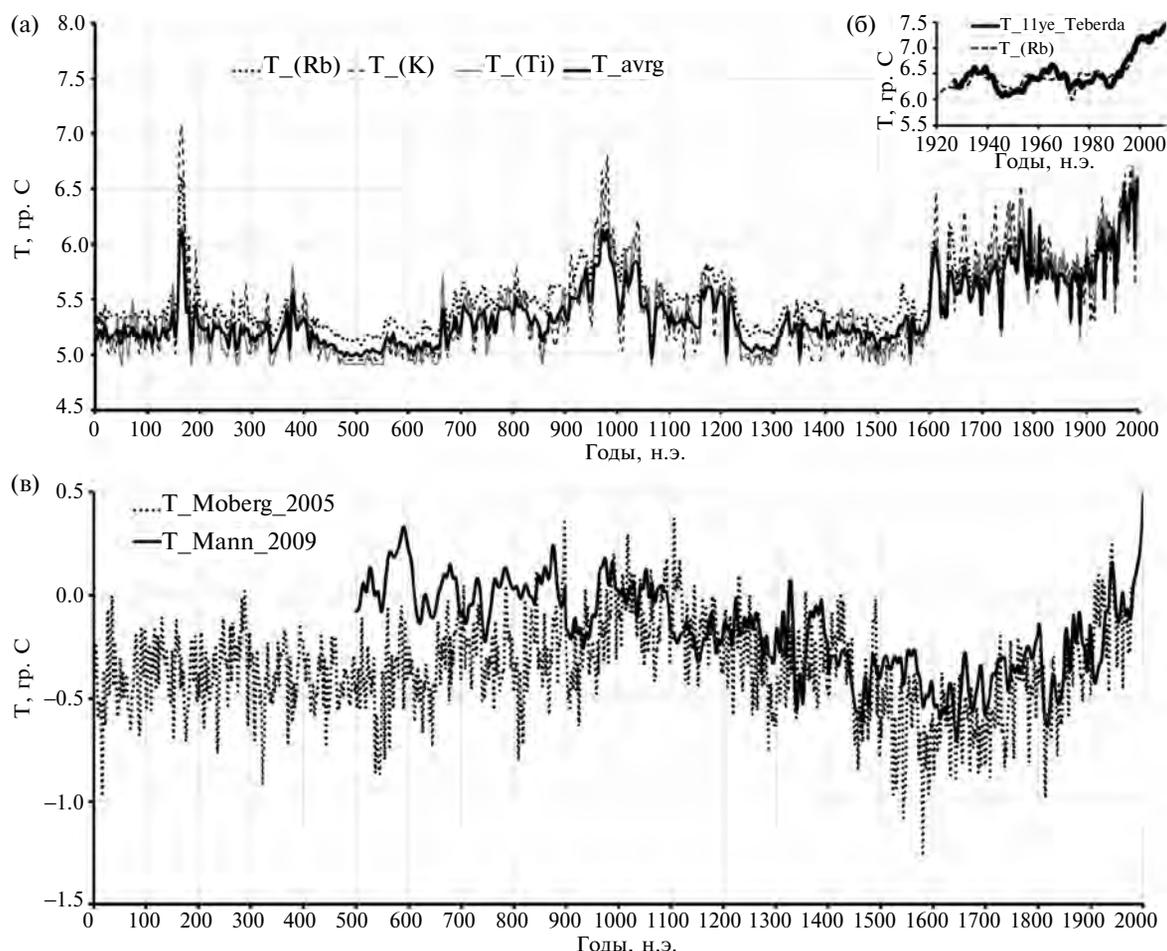
В нашем случае наблюдаются явные аномальные повышения содержаний большинства элементов в двух интервалах мастер-керна: 164–230 мм и 544–566 мм (см. рис. 2). По-видимому, эти интервалы связаны с разовыми сбросами большого количества терригенного материала – аналогами турбидитных отложений в морях и океанах. Также фактором в пользу событийного происхождения рассматриваемых интервалов служит совпадение оценок возраста для образцов, взятых с глубин 180 и 210 мм. Радиоизотопный возраст для обеих глубин дает одинаковую оценку 640 лет назад, что логично, если это одномоментный сброс вещества одного состава.

Таким образом, есть основания удалить два интервала, нарушающие непрерывную хронологию, из мастер-керна донных осадков оз. Каракель, после чего построить новую временную модель – модель 2 на рис. 4. Все дальнейшие реконструкции сделаны на временных рядах, построенных на этой модели.

**Построение реконструкций изменения 11-тилетней температуры региона на интервале опробования.** С использованием рассчитанных трансферных функций был построен набор реконструкций изменения 11-тилетней температуры региона на временном интервале последних тысячелетий. На рис. 7а, в качестве



**Рис. 6.** Примеры получения трансферных функций для Rb и Ti, устанавливающих количественную связь между содержаниями элементов в датированных слоях донного осадка оз. Каракель и 11-летними температурами региона.



**Рис. 7.** (а) – реконструкции средней 11-тилетней температуры по литолого-геохимическим данным донных осадков оз. Каракель; (б) – сравнение одной из реконструкций, полученной по содержанию Rb, с метеоданными на интервале обучения (1927–2010 гг.); (в) – температурные реконструкции для Северного полушария по литературным данным.

примера, представлена часть реконструкций, рассчитанных по временным рядам отдельных элементов: двух породообразующих – К и Ti и одному микроэлементу – Rb. Также представлена суммарная реконструкция, объединяющая все использованные элементы.

**Обсуждение.** Вариации терригенной, биогенной и аутигенной составляющих в озерных осадках характеризуют изменения окружающей среды и климата на протяжении времени их формирования, однако интерпретация этой информации очень сложна и, зачастую, неоднозначна. Статистический анализ показывает чрезвычайно высокую корреляцию между содержанием химических элементов в керне оз. Каракель – К, Ti, Zn, Rb, Y, Nb, U и метеорологическими параметрами – среднегодовым количеством осадков и среднегодовой температурой. Эта связь положительна для всех представленных терригенных элементов. Наличие подобных корреляционных связей объяснимо, так как химический состав компонентов глинистой фракции осадка, на-

пример коэффициент химического выветривания, позволяет судить о соотношении в осадке первичных и вторичных минералов, и косвенно связан с изменениями климата [7]. В работе [5] показано, что среди геохимических индикаторов особенно информативными являются такие породообразующие элементы, как К, Са, Ti, Fe, Mn и микроэлементы, характеризующие терригенную (Cu, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Sn, Ba) и органогенную (Br, I, Mo, U) компоненты осадка, а также соотношение Sr/K, Ca/Sr, Br/Rb и др. На практике эти зависимости удалось использовать для реконструкции температуры на Алтае – по соотношению стронция к рубидию и содержанию брома и титана в осадках Телецкого озера. Было показано, что соотношение Sr/Rb является индикатором доли невыветрелой обломочной фракции и отражает температуру сезона снеготаяния, содержание брома связано с биопродуктивностью на водосборе [5]. Ранее [12] было проведено сопоставление отношения Sr/Rb в приледниковых

водах (оз. Турье, р. Алибек) и в оз. Каракель и его притоке. Оно показало, что разница составляет несколько порядков (0.4 и 4.1 в высокогорье и 132 и 215 в Каракеле и впадающем в него ручье). Очевидно, что интенсивность выветривания, о которой косвенно свидетельствует соотношение Sr/Rb, зависит от температуры, а интенсивность поступления продуктов выветривания в озеро – от количества осадков [17]. Сопоставление концентрации брома в сапропеле оз. Каракель с данными пылевого анализа показывает явное сходство хода этого показателя с колебаниями общего содержания пылицы как древесных, так и травянистых растений. Лучше всего общее содержание брома согласуется с ходом кривой концентрации пылицы широколиственных пород. Обе характеристики могут быть связаны с теплообеспеченностью, которая положительно влияет и на пылевую продуктивность, и на содержание брома в осадке [12].

Для каждого водоема набор геохимических индикаторов, которые наиболее тесно связаны с изменениями окружающей среды, индивидуален. В этой работе обнаружены наиболее тесные корреляционные связи температуры и осадков с содержанием в керне терригенных элементов K и Ti и микроэлемента Rb. Показательно, что кривые содержания этих элементов в осадке имеют очень высокое сходство между собой, что дает основание использовать их осреднение для большей надежности результатов.

В нашем случае отмечаются положительные корреляции геохимических параметров и с температурой, и с количеством атмосферных осадков. Эта связь не случайна: высокие температуры и повышенное увлажнение способствуют более высокой интенсивности выветривания пород и отложения продуктов этого выветривания на дне озер. Сравнительный анализ метеопараметров показывает, что среднегодовые температуры и осадки положительно коррелируют между собой за период 1927–2009 гг. с коэффициентом корреляции +0.42. Таким образом, отмечается тенденция к сочетанию: тепло–влажно, сухо–холодно. На Кавказе это характерно для зимних условий: холодная сухая антициклональная погода связана в основном со вторжениями воздуха с севера, а циклоны приносят с собой тепло и осадки.

Одна из существенных проблем при создании высокоразрешающих реконструкций на основе озерных не ламинированных осадков – надежный хронологический контроль. В этой работе мы использовали данные сканирующего РФА СИ для объединения двух кернов в одну мастер-хронологию, которая, в свою очередь, основана на 11 радиоуглеродных датировках. В нашей предыдущей работе мы предполагали, что осад-

конакопление в оз. Каракель происходит с постоянной скоростью, примерно равной 0.22 мм в год, которая увеличивается только в самой верхней части отложений. Более детальный анализ результатов РФА СИ показал, что этот монотонный процесс периодически нарушался, и в озеро единовременно поступало большое количество обломочного материала. Для того, чтобы хронологическая шкала не нарушалась, эти катастрофические события необходимо идентифицировать и исключить из мастер-хронологии. На основе геохимического анализа удалось выявить и удалить из разреза два таких события – 640 и более 1600 лет назад.

Следует отметить, что ранее в отложениях оз. Каракель [8] выделено несколько перетолженных диатомовых комплексов, которые определялись по характерному изменению таксономических пропорций. Таким образом, мы не можем исключить вероятности и других нарушений в процессе отложения осадков в озеро, но, вероятно, если они и случались, то были меньшего масштаба, чем событие, случившееся около 640 л.н. Об этом свидетельствуют и геохимический анализ, и результаты AMS датирования, поскольку вся совокупность датировок в целом хорошо описывается линейной функцией.

Катастрофические события, связанные с дополнительным поступлением вещества в озеро, могут происходить по нескольким причинам. Стабильное формирование современных отложений могло быть нарушено антропогенной деятельностью, но в масштабах, несоизмеримых с природными событиями. Селевые потоки могут быть основным источником нарушения непрерывных осадочных последовательностей. В настоящее время в озеро поступает небольшое количество воды и наносов из р. Теберда. Но периодически, при высоком уровне воды в реке, объем воды и взвеси, в которых преобладает ледниковая составляющая, также мог поступать в озеро и откладываться в озерных осадках, резко увеличивая скорость осадконакопления. Учитывая тектоническую активность района, единовременное поступление терригенного материала в озеро может быть связано с сейсмообвалами, аналогично событиям в долине Баксана, датированным величиной  $1440 \pm 40$  и  $1400 \pm 60$  лет [9].

Сравнение полученной реконструкции температуры воздуха за последние 2 тыс. лет показывает, что в целом она хорошо согласуется с литературными данными. Амплитуда изменчивости температур не превосходит 2 °С, что характерно и для других районов умеренной зоны Евразии [24]. Выделяется два продолжительных периода потепления – современный и на рубеже первого и второго тысячелетия новой эры.

Два периода похолодания в V–VII и XIII–XV вв. примерно совпадают с двумя холодными интервалами около 1300–1200 и 400–350 л.н., выделенными Е.В. Квавадзе и Ю.В. Ефремовым [18], которые исследовали озерные и озерно-болотные отложения в долине Архыза. Относительное похолодание отмечается на нашей реконструкции и в XIX в., когда по многочисленным данным было зафиксировано несколько наступлений ледников. XVIII в. по многим косвенным данным был теплым [23]. Несколько неожиданным выглядит на нашей кривой XVII в., который во многих районах северного полушария был холодным. По современным представлениям, в XVII в. на Кавказе было мощное наступление ледников, и оледенение было существенно больше по размерам, чем в период наступания XIX в. Возможно, эти противоречия можно объяснить некоторым сбоем в хронологии осадконакопления в оз. Каракель. Период с VIII по XII вв. соответствует “архызскому перерыву”, т.е. периоду средневекового оптимума, который выделяется на Кавказе по спорово-пыльцевым и археологическим данным [13, 23]. О климате первого тысячелетия в этом регионе известно очень мало и наша реконструкция, видимо, является первой, которая дает некоторое представление о количественных изменениях температуры на северном Кавказе в это время.

По сравнению с глобальными реконструкциями температуры Северного полушария [19, 20] полученная реконструкция температуры на Кавказе выглядит более контрастной, с ярко выраженной низкочастотной составляющей и периодами потеплений и похолоданий (рис. 7в). На ней также гораздо более явно выражен средневековый оптимум. Также как и на полушарной кривой, на Кавказе примерно с XVII в. начинается тренд к потеплению. Современное потепление по своим масштабам выглядит примерно равным потеплению в период пика средневекового оптимума и в теплое время начала 1 тыс. н.э.

**Заключение.** Использование высокоразрешающих современных методик исследования (микро-РФА СИ) донных осадков оз. Каракель позволило успешно решить следующие задачи:

- построить мастер-кern путем объединения кернов 2010 и 2014 гг.;
- выявить период массового поступления аллохтонного материала в озеро и внести корректировку в кривую скорости осадконакопления;
- установить наличие корреляционных связей между среднегодовыми температурами воздуха и осадками (гмс Теберда) с одной стороны, и содержанием в озерных отложениях геохимических индикаторов с другой;
- построить реконструкцию среднегодовых температур за последние 2 тыс. лет с 11-летним

осреднением и шагом опробования, соответствующим 5–10 годам.

Реконструкция температуры воздуха за 2 тыс. лет с таким разрешением на Кавказе выполнена впервые. В будущем планируется провести высокоразрешающие реконструкции изменений природной среды в этом районе на основе спорово-пыльцевого и диатомового анализов и сопоставить полученные результаты. Это даст возможность уменьшить неопределенности, связанные с новым методом палеореконструкций, использованным в этой работе.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 17-35-50134 и частично № 16-05-00647 (построение временной модели), ГЗ № 0148-2018-0005 (построение реконструкции) текущего Государственного задания (ИГ РАН). Использовалось оборудование ЦКП “СЦСТИ” на базе ВЭПП-3/ВЭПП-4М/НЛСЭ ИЯФ СО РАН, поддержанного Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62117X0012”).

**Funding.** The research was supported by RFBR grant no. 17-35-50134, partially no. 16-05-00647 (creating age-depth model), the Government Contract no. 0148-2018-0005 (creating reconstruction), the current Government Contract (Institute of Geography RAS). The infrastructure of the Shared-Use Center “Siberian Synchrotron and Terahertz Radiation Center (SSTRC)” based on VEPP-3/VEPP-4M/NovoFEL of BINP SB RAS was employed funded by Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project RFMEFI62117X0012).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дарьин А.В., Калугин И.А., Ракишун Я.В. Сканирующий рентгеноспектральный микроанализ образцов донных осадков с использованием синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН // Изв. РАН. Сер. физическая. 2013. Т. 77. № 2. 204 с.
2. Дарьин А.В., Ракишун Я.В. Методика выполнения измерений при определении элементного состава образцов горных пород методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 // Науч. Вестн. Новосиб. тех. ун-та. 2013. № 2 (51). С. 112–118.
3. 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 // Докл. Академии наук. 2015. Т. 463. № 5. 602 с.
4. Дарьин А.В., Гольдберг Е.Л., Калугин И.А., Федорин М.А., Золотарев К.В., Максимова Н.В. Отношение интенсивностей упруго- и неупруго-рассеянного на образце синхротронного излучения

- ния – климатически коррелированный палеосигнал в историческом слое (1860–1996 гг.) донных осадков оз. Телецкое // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2003. № 12. С. 53–55.
5. Калугин И.А., Дарьин А.В., Бабич В.В. 3000-летняя реконструкция среднегодовых температур Алтайского региона по литолого-геохимическим индикаторам донных осадков оз. Телецкое // Докл. Академии наук. 2009. Т. 426. № 4. С. 520–522.
  6. Князев А.В., Савинецкий А.Б., Гей Н.А. История растительного покрова северной Осетии в голоцене. В сб.: Историческая экология диких и домашних копытных. История пастбищных экосистем. М.: Наука, 1992. С. 84–108.
  7. Палеогеографические методы исследований / ред. И.А. Каревская, А.В. Панин. М.: географический факультет МГУ, 2012. 200 с.
  8. Разумовский Л.В., Разумовский В.Л. Регистрация новейших экосистемных событий в озере Каракель по переложенным диатомовым комплексам // Вестн. Тюменского ун-та. Социально-экономические и правовые исследования. 2013. № 12. С. 121–127.
  9. Рогожин Е.А. Реконструкция долговременно-го сейсмического режима с использованием палеосейсмологических данных // Экстремальные природные явления и катастрофы. 2010. Т. 1. С. 44–64.
  10. Серебрянный Л.Р., Голодковская Н.А., Орлов А.В., Малясова Е.С., Ильвес Э.О. Колебания ледников и процессы моренонакопления на Центральном Кавказе. М.: Наука, 1984. 216 с.
  11. 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. Вып. 2. С. 102–111.
  12. Соломина О.Н., Калугин И.А., Дарьин А.В., Чепурная А.А., Александрин М.Ю., Кудерина Т.М. Использование геохимического и пылевого 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.: Изд. дом “Кодекс”, 2014. С. 234–266.
  13. Тушинский Г.К. Архызский перерыв в оледенении и лавинной деятельности на Кавказе в первом тысячелетии н. э. // Инф. сб. о работах по Международному геофизическому году. 1964. №. 10. С. 96.
  14. Baryshev V.B., Gavrilov N.G., Daryin A.V., Zolotarev K.V., Kulipanov G.N., Mezentssev N.A., Terkhov Y.V. Scanning x-ray fluorescent microanalysis of rock samples // Rev. of Sci. Instruments. 1989. V. 60 (7). P. 2456–2457.
  15. Daryin A.V., Baryshev V.B., Zolotarev K.V. Scanning X-ray fluorescence microanalysis of phosphorites from the underwater mountains of the Pacific. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 1991. V. 308 (1–2). P. 318–320.
  16. Dolgova E. June–September temperature reconstruction in the Northern Caucasus based on blue intensity data // Dendrochronologia. 2016. V. 39. P. 17–23.
  17. Kalugin I., Selegei V., Goldberg E., et al. Rhythmic fine-grained sediment deposition in Lake Teletskoye, Altai, Siberia, in relation to regional climate change // Quat. Int. 2005. T. 136. № 1. P. 5–13.
  18. Kvavadze E.V., Efremov Yu.V. Palynological studies of lake and lake-swamp sediments of the Holocene in the high mountains of Arkhiz (Western Caucasus) // Acta Paleobotanica. 1996. V. 36. № 1. P. 107–119.
  19. Mann M.E., Zhang Zh., Rutherford S., et al. Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly // Science. 2009. V. 326. № 5957. P. 1256–1260.
  20. Moberg A., Sonechkin D.M., Holmgren K., et al. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low-and high-resolution proxy data // Nature. 2005. V. 433. № 7026. 613 p.
  21. Nesje A. A piston corer for lacustrine and marine sediments // Arctic and Alpine Research. 1992. № 44 (3). P. 257–259. DOI: 10.2307/1551667
  22. Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., et al. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50.000 years cal BP // Radiocarbon. 2013. V. 55. Issue 4. P. 1869–1887.
  23. Solomina O., Bushueva I., Dolgova E., Jomelli V., Alexandrin M., Mikhalevko V., Matskovsky V. Glacier variations in the Northern Caucasus compared to climatic reconstructions over the past millennium // Global and Planetary Change. 2016. V. 140. P. 28–58.
  24. Wanner H., Beer J., Buřtikofer J., Crowley Th.J., et al. Mid-to Late Holocene climate change: an overview // Quat. Sci. Rev. 2008. V. 27. № 19–20. P. 1791–1828.

## REFERENCES

1. Dar'in A.V., Rakshun Ya.V. Scanning X-ray microanalysis of bottom sediments using synchrotron radiation from the BINP VEPP-3 storage ring. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Fiz.*, 2013, no. 77(2), 182–184 p. (In Russ.).
2. Dar'in A.V., Kalugin I.A., Rakshun Ya.V. Method of measurement during determination of the elemental composition of rock samples by X-ray fluorescence analysis using synchrotron radiation from the VEPP-3 storage ring. *Nauchn. Vestn. Novosibirsk. Gos. Tekhn. Univ.*, 2013, pp. 112–118. (In Russ.).
3. Dar'in A.V., Alexandrin M.Y., Kalugin I.A., Solomina O.N. Influence of meteorological conditions on the geochemistry of modern bottom sediments exemplified by deposits of Donguz-Orun Lake, Caucasus. *Doklady Earth Sciences*, 2015, vol. 463, no. 2, pp. 842–846. (In Russ.).

4. Dar'in A.V., Goldberg E.L., Kalugin I.A., Fedorin M.A., Zolotarev K.V., Maksimova N.V. Ratio coherent/incoherent scattering on the sample as climatic correlated paleosignal in historical layer (1860–1996) of Teletskoe bottom sediments. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, Sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya*, 2003, no. 12, pp. 53–55. (In Russ.).
5. Kalugin I.A., Daryin A.V., Babich V.V. Reconstruction of annual air temperatures for three thousand years in Altai region by lithological and geochemical indicators in Teletskoe Lake sediments. *Doklady Earth Sciences*, 2009, vol. 426, no. 1, pp. 681–684.
6. Knyazev A.V., Savinetsky A.B., Gei N.A. History of North Osetia vegetation during the Holocene. In *Istoricheskaya ekologiya dikikh i domashnikh kopytnykh. Istoriya pastbishchnykh ekosistem* [Historical Ecology of Wild and Domestic Ungulates. History of Pasture Ecosystems]. Moscow: Nauka Publ., 1992, pp. 84–108. (In Russ.).
7. *Paleogeograficheskie metody issledovaniy* [Paleogeographic Methods of Research]. Karevskaya I.A., Panin A.V., Eds. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2012. 200 p. (In Russ.).
8. Razumovsky L.V., Razumovsky V.L. Record of the recent ecosystem events in Karakel Lake on the basis of redeposited diatom assemblages. *Vestn. Tyumenskogo Gos. Univ.*, 2013, no. 12, pp. 100–105. (In Russ.).
9. Rogozhin E.A. Reconstruction of the long-term seismic regime using the paleoseismogeological data. In *Ekstremal'nye prirodnye yavleniya i katastrofy* [Extreme Natural Phenomena and Catastrophes], vol. 1: *Otsenka i puti snizheniya negativnykh posledstviy ekstremal'nykh prirodnykh yavlenii* [Assessment of Negative Effects of Extreme Natural Phenomena and Methods for their Diminishment]. Gliko A.O., Ed. Moscow: IFZ RAN, 2010, pp. 44–54. (In Russ.).
10. Serebryannyi L.R., Golodkovskaya N.A., Orlov A.V., Malyasov E.S., Ilves E.O. *Kolebaniya lednikov i protsessy morenonakopleniya na Tsentral'nom Kavkaze* [Glacier Oscillations and Moraine Accumulation Processes in the Central Caucasus]. Moscow: Nauka Publ., 1984. 216 p.
11. Solomina O.N., Kalugin P.A., Aleksandrin M.Y., Bushueva I.S., Darin A.V., Dolgova E.A., Jomelli V., Ivanov M.N., Matskovsky V.V., Ovchinnikov D.V., Pavlova I.O., Razumovsky L.V., Chepurnaya A.A. Coring of Karakel' Lake sediments (Teberda River valley) and prospects for reconstruction of glaciation and Holocene climate history in the Caucasus. *Ice and Snow*, 2013, no. 53(2), pp. 102–111. (In Russ.).
12. Solomina O.N., Kalugin I.A., Darin A.V., Chepurnaya A.A., Alexandrin M.Y., Kuderina T.M. The implementation of geochemical and palynological analyses of the sediment core of Lake Karakyoel for reconstructions of climatic changes in the valley of Teberda river (Northern Caucasus) during the Late Holocene: possibilities and restrictions. In *Voprosy geografii. Sb. 137: Gornye issledovaniya* [Problems of Geography. Vol. 137: Mountain Studies]. Moscow: Kodeks Publ., 2014, pp. 234–266. (In Russ.).
13. Tushinsky G.K. Arkhyz break in glaciation and avalanche activity in the Caucasus in the 1st century BC. In *Informatsionnyi sbornik o rabotakh po Mezhdunarodnomu geofizicheskomu godu* [Informational Collection on the Studies of the International Geophysical Year]. 1964, no. 10, 96 p. (In Russ.).
14. Baryshev V.B., Gavrilov N.G., Daryin A.V., Zolotarev K.V., Kulipanov G.N., Mezentsev N.A., Terkhov Y.V. Scanning X-ray fluorescent microanalysis of rock samples. *Rev. Sci. Instrum.*, 1989, no. 60(7), pp. 2456–2457.
15. Daryin A. V., Baryshev V. B., Zolotarev K. V. Scanning X-ray fluorescence microanalysis of phosphorites from the underwater mountains of the Pacific. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 1991, vol. 308(1–2), pp. 318–320.
16. Dolgova E. June–September temperature reconstruction in the Northern Caucasus based on blue intensity data. *Dendrochronologia*, 2016, no. 39, pp. 17–23.
17. Kalugin I., Selegei V., Goldberg E., Seret G. Rhythmic fine-grained sediment deposition in Lake Teletskoye, Altai, Siberia, in relation to regional climate change. *Quat. Int.*, 2005, vol. 136, no. 1, pp. 5–13.
18. Kavadze E.V., Efremov Yu.V. Palynological studies of lake and lake-swamp sediments of the Holocene in the high mountains of Arkhiz (Western Caucasus). *Acta Paleobot.*, 1996, vol. 36, no. 1, pp. 107–119.
19. Mann M.E. et al. Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science*, 2009, vol. 326, no. 5957, pp. 1256–1260.
20. Moberg A., Sonechkin D.M., Holmgren K., Datsenko N.M., Karlén W. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*, 2005, vol. 433, no. 7026, 613 p.
21. Nesje A. A piston corer for lacustrine and marine sediments. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, 1992, no. 24(3), pp. 257–259.
22. Reimer P. J. et al. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 2013, vol. 55, no. 4, pp. 1869–1887.
23. Solomina O., Bushueva I., Dolgova E., Jomelli V., Alexandrin M., Mikhaleiko V., Matskovsky. Glacier variations in the Northern Caucasus compared to climatic reconstructions over the past millennium. *Glob. Planet. Change*, 2016, vol. 140, pp. 28–58.
24. Wanner H. et al. Mid-to Late Holocene climate change: an overview. *Quat. Sci. Rev.*, 2008, vol. 27, no. 19–20, pp. 1791–1828.

## Dynamics of the Regional Climatic Conditions over the Past 2000 Years on the Basis of Lithogeochemical Analysis of the Bottom Sediments of Lake Karakoyol (Western Caucasus)

M. Yu. Alexandrin,<sup>1,\*</sup> A. V. Darin,<sup>2</sup> A. M. Grachev,<sup>1</sup> and O. N. Solomina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch,  
Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

\*e-mail: alexandrin@igras.ru

Received August 16, 2018; revised September 11, 2018; accepted September 21, 2018

Reference section of the bottom sediments of Lake Karakoyol (Caucasus) is built based on the cores obtained during the 2010 and 2014 field works, taking into account radiocarbon dating and the data of analytical microstratigraphy. Using the methods of scanning micro-XRF, solid preparations of bottom sediments were scanned in 1 mm increments with simultaneous determination of the content of more than 25 rock-forming and microelements. When building the master-core, the profiles of changes in the content of terrigenous elements were taken into account. This made it possible to precisely combine the two cores and remove from the section the sediment intervals corresponding to the “one-time” events – terrigenous material injections. Comparison of instrumental data of regional meteorological observations in the period 1927–2010 with the time series of geochemical indicators showed the presence of a stable relationship of the composition of bottom sediments with the average 11-year temperatures. Approximation of transfer functions to the depth of core testing allowed constructing a paleoclimatic reconstruction of regional temperature for the last 2 millennia with a time resolution of 5–10 years.

**Keywords:** paleoclimate, micro-XRF, analytical microstratigraphy, Caucasus, bottom sediments, lakes, Late Holocene.