

На правах рукописи

Степанова Ольга Геннадьевна

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ДИНАМИКИ ЛЕДНИКОВ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ В
ГОЛОЦЕНЕ – ПОЗДНЕМ ПЛЕЙСТОЦЕНЕ НА ОСНОВЕ РАСШИФРОВКИ
МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ИЗ ДОННЫХ ОСАДКОВ
ПРОГЛЯЦИАЛЬНЫХ ОЗЕР**

Специальность 25.00.09 – геохимия, геохимические
методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Лимнологическом институте Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

Федотов Андрей Петрович, доктор геолого-минералогических наук, директор ФГБУН Лимнологического института СО РАН, заведующий лаб. палеолимнологии

Официальные оппоненты:

Субетто Дмитрий Александрович, доктор географических наук, декан факультета географии Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, г. Санкт-Петербург.

Страховенко Вера Дмитриевна, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры минералогии и геохимии ГГФ НГУ, ведущий научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск.

Ведущая организация:
Казань

Казанский федеральный университет, г.

Защита состоится «__» ____ в _____ 2019 г. на заседании диссертационного совета Д003.059.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН по адресу: 664033, Иркутск, ул. Фаворского 1а, факс: 8 (3952) 42-70-50; e-mail: korol@igc.irk.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте <http://www.igc.irk.ru> Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

к.г.-м.н.

Г.П. Королёва

Введение

Актуальность. Период Современного потепления (с ~1850 г. по настоящее время) характеризуется глобальным отступанием ледников [Solomina, 2000]. При этом за последние 50–60 лет отмечается резкое усиление деградации ледников под действием антропогенного фактора. Согласно оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC) от одной трети до половины существующих горных ледников могут исчезнуть в течение ближайшего столетия из-за выбросов парниковых газов в атмосферу Земли [Gelbspan, 1997]. В связи с этим видится весьма важным «успеть» изучить эти объекты.

На фоне довольно хорошей изученности ледников Европы, Северной Америки и Канады, знания о динамике ледников Восточной Сибири голоцен-позднеплейстоценового периода во многом еще фрагментарны. Между тем эти ледники, располагающиеся на значительном удалении от океанических источников влаги, в зоне резко континентального климата, должны быть наиболее чувствительны к изменению региональных климатических параметров.

В настоящее время актуальной научной проблемой становится детализация изменений климата последних тысячелетий, когда остаются нерешенными вопросы, связанные с короткопериодными осцилляциями палеоклимата на континентальных территориях, значительно удаленных от Мирового океана. В связи с этим, работа направлена на реконструкцию изменений ледников Восточной Сибири под действием глобальных и региональных климатических факторов в голоцене – позднем плейстоцене.

Основная цель работы: Расшифровка биогеохимических индикаторов палеоклимата, содержащихся в осадочных разрезах высокогорных озер, примыкающих к ледникам Восточной Сибири (Байкальский регион), как параметров эволюции ледников в голоцене – позднем плейстоцене.

Задачи:

1. Литолого-геохимическое и биологическое изучение вещественного состава донных осадков малых озер Восточной Сибири, питающихся талыми водами ледников Восточного Саяна, Байкальского, Кодарского хребтов с высоким шагом временного разрешения, порядка год-десятилетие.

2. Определить хронологию динамики изучаемых ледников на основе датирования озерных разрезов по распределению активностей изотопов ^{14}C , ^{137}Cs , ^{210}Pb .

3. Литологическое изучение и радиоуглеродное датирование наземных голоцен-позднеплейстоценовых разрезов Северного Байкала.

4. Классификация собранных геохимических данных методами многомерной математической статистики.

5. Разработка системы биогеохимических индикаторов, содержащихся в донных отложениях прогляциальных озер, позволяющих интерпретировать динамику ледников.

6. Определение индивидуальных характеристик отклика ледников, расположенных в Восточном Саяне, Байкальском и Кодарском хребтах на глобальные и региональные климатические изменения в голоцене.

Фактический материал и методы исследований.

Данные о вещественном составе донных осадков прогляциальных озер получены на основе изучения 12 коротких кернов (до 1 м) из 8 озер. Основное место в исследованиях занимает расшифровка геохимического сигнала, наложенного на менее детальную летопись минеральных и биогенных компонентов. Элементный состав кернов изучался рентгенофлуоресцентным методом анализа с синхротронным

излучением в режиме сканирования (РФА-СИ). Данным методом просканировано 7 кернов. Измерения выполнялись в ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск). Кроме этого элементный состав изучался методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) (проанализировано 283 образца). Данные по элементному составу донных отложений дополнены профилями распределения кварца и полевых шпатов, биогенного кремнезема, органического углерода, полученных методом инфракрасной спектроскопии (ИК) с шагом опробования до 0,5 см (1008 образцов).

Диатомовый анализ выполнен с шагом в 1 см (422 образца).

Для определения особенностей геохимического, минералогического состава «фоновых» потоков материала на дно озер устанавливались годовые придонные седиментологические ловушки, и опробовались водотоки впадающие в озера.

Возрастная шкала для верхнего слоя отложений строилась на основе радиоизотопного ^{210}Pb датирования (с контролем по ^{137}Cs). Измерения выполнялись в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Горизонты керна, к которым не может быть применен метод радиоизотопного ^{210}Pb датирования, были датированы по ^{14}C на основе метода ускорительной масс-спектрометрии. Получено 16 дат. Измерения выполнялись в совместной лаборатории радиоуглеродных методов анализа (ЛРМА) НГУ-ННЦ (г. Новосибирск).

Защищаемые положения:

1. В элементном составе донных отложений приледниковых озер выделяются геохимические группы элементов, отображающих поступление терригенной составляющей и развитие биопродуктивности озера. Увеличение содержания Са, К, Ti, Fe и Mn является маркером умеренной поставки кластогенного материала в озеро, когда ледник находится в «стационарном» положении без интенсивного смещения его переднего края. Повышение содержания Rb, Sr, Zr, Nb, Y и Th связано с началом «движения» ледника и интенсификацией процесса ледниковой эскаррации его ложа.

2. Активное смещение передней границы ледника вызывает снижение биопродуктивности приледниковых озер за счет поставки тонкодисперсной ледниковой взвеси. Существует обратная взаимосвязь между характером распределения геохимической группы Rb, Sr, Zr, Nb, Y и Th и маркерами биопродуктивности озера: геохимической группой Ni, Cu, Vg и U, общим количеством диатомей, биогенным кремнеземом.

3. Плейстоценовые ледники Восточного Саяна, Кодарского и Байкальского хребтов полностью растаяли к началу голоцена. Современные ледники в южной части Восточной Сибири сформировались в Малый ледниковый период. За последние 210 лет наибольшие скорости дегляциации имеет ледник Перетолчина (В. Саян), а наименьшую – ледник горы Черского (Байкальский хребет).

Научная новизна работы.

Впервые обосновывается время формирования современных ледников Восточной Сибири. Уточняется время образования крупнейшего ледникового комплекса Прибайкалья – Томпудинская морена, позволяющее говорить, что масштабы оледенения последнего ледникового максимума плейстоцена в Северном Прибайкалье были больше, чем это считалось ранее.

2. Определена специфика процессов формирования биотерригенных осадков в прогляциальных озерах в условиях существующих ледников.

3. Разработана схема биогеохимических признаков донных отложений озер, позволяющих реконструировать динамику движения ледников.

4. Впервые с высоким временным разрешением определены индивидуальные характеристики динамики ледников Восточного Саяна, Байкальского и Кодарского хребтов в голоцене.

5. Составлены корреляционные схемы ответа ледников Восточной Сибири на изменения глобальных и региональных климатических параметров в голоцене.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть применимы при изучении закономерностей межгодовой и многолетней изменчивости водных объектов Сибири; для выявления степени влияния природных и антропогенных факторов на динамику развития водных объектов; при изучении динамики ледников как важнейшей составляющей водных ресурсов.

Достоверность результатов работы. Обеспечена большим количеством проб и массивом полученных данных (проанализировано 1750 образцов). Современными методиками пробоподготовки, высокоточными аттестованными аналитическими методами в центре коллективного пользования ЛИН СО РАН г. Иркутск, в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения (ЦСТИ, Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск), в институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН г. Новосибирск. Публикациями в ведущих российских и зарубежных изданиях.

Апробация работы. Основные положения диссертации неоднократно докладывались на российских и международных конференциях и симпозиумах. Таких как: десятое Уральское литологическое совещание «Виртуальные и реальные литологические модели» (Екатеринбург, 2014); «Paleolimnology of Northern Eurasia» (Petrozavodsk, 2014); XX Национальная конференция по использованию Синхротронного Излучения «СИ-2014» (Новосибирск, 2014); Шестая международная Верещагинская Байкальская конференция (Иркутск, 2015); международная молодежная научно-практическая конференция «Россия-Монголия» (Иркутск, 2016); международная конференция «Пресноводные экосистемы – современные вызовы» (Иркутск, 2018); 3rd International conference «Paleolimnology of Northern Eurasia: Experience, methodology, current status» (Kazan, 2018).

Личный вклад соискателя заключается в определении элементного состава донных отложений методом ИСП-МС, в изучении литологических свойств осадка. Цифровой обработке изображений донных отложений, с построением графиков изменчивости цветовой гаммы донных отложений по длине кернов. Участие в полевых исследованиях по изучению наземных ледниковых разрезов. Построение глубинно-возрастных моделей для осадочных разрезов. Математическая обработка полученных данных методами многомерной статистики. Все научные и практические результаты, изложенные в диссертации, получены лично или в соавторстве с научным руководителем А.П. Федотовым.

Структура и объем работ. Диссертация изложена на 157 страницах и состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы. Она иллюстрирована 40 графиками-схемами, 11 фотографиями, 9 таблицами. Список литературы включает 256 источников.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ, как в российских, так и в иностранных изданиях. Из них 8 статей (в том числе 5 – в зарубежной печати), 7 тезисов.

Благодарности. Автор выражает признательность своему научному руководителю д.г.-м.н. А.П. Федотову за руководство и содействие при подготовке работы, к.г.-м.н. Е.Г. Вологиной за ценные замечания и советы при руководстве аспирантской подготовкой. Я крайне признательна своим коллегам, оказывающим

содействие в ходе лабораторных исследований и при проведении экспедиционных работ: д.х.н. В.А. Труновой за проведение РФА-СИ исследований, к.б.н. С.С. Воробьевой, гл. спец Т.О. Железняковой за выполнение диатомового анализа, к.х.н. С.К. Петровскому, гл. спец. С.М. Крапивиной за проведение ИК-спектроскопических исследований, к.г.н. Э.Ю. Осипову, к.б.н. К.Е. Вершинину, к.б.н. И.В. Енущенко и к.г.-м.н. Е.Е.Кононову за проведение полевых исследований по изучению наземных ледниковых разрезов, к.г.-м.н. М.С. Мельгунову за помощь в изотопном датировании кернов.

Глава 1 посвящена проблеме и состоянию изученности динамики ледников

Рассматриваются глобальные и региональные проблематики изучения ледников Северного полушария. В течение современного потепления климата, продолжающегося уже 160 лет, площади оледенения в целом сократилось и в Северном, и в Южном полушариях [IPCC, 2007].

Большая часть ледников в горах юга Восточной Сибири изучалась в 1950–1960-х годах по материалам аэрофотосъемки и полевых исследований. В 2006–2017 гг. с использованием космических снимков высокого разрешения были проведены повторные инвентаризации ледников в Восточном Саяне (массивы Мунку-Сардык и пик Топографов), на Байкальском и Кодарском хребтах.

Приледниковые озера, в которых аккумулируются продукты экзарационной деятельности ледников, служат идеальными ловушками осадков и являются важным источником палеогляциологической информации.

В главе 2 физико-географическое описание районов исследования показано, что Восточная Сибирь, расположенная вдали от океанов, испытывает дефицит влагообеспечения. Основным поставщиком влаги в регион является сильно редуцированный Северо-Атлантический влагоперенос [Кузнецова, 1978]. В работе даются климатические, орографические особенности районов исследования, и метрические характеристики ледников.

Восточный Саян – горная система, протягивается с северо-запада на юго-восток (свыше 1000 км) от левого берега Енисея до Байкала, высшая точка – г. Мунку-Сардык, 3491 м. В работе проводится реконструкция динамики Северного ледник Перетолчина расположенного в данном горном массиве.

Кодарский хребет расположен на северо-восточной окраине Байкальской горной области. В работе изучались озера, примыкающие к ледникам Преображенского (восточный Сыгыктинский), Колосова, Азаровой, №19, и озеро Орон, аккумулирующее в себя талые воды многих ледников Кодара.

Байкальский хребет простирается вдоль западного побережья оз. Байкал. Ледник горы Черского (№1) (55,06° с.ш., 108,69° в.д.) находится на восточном склоне г. Черского в верховье реки Куркула (Байкальская). Сток с ледника приходится на каскад озер Изумрудное и Гитара.

Глава 3. Методы получения фактического материала и его лабораторные исследования

Для изучения распределения элементного состава вдоль кернов донных отложений был проведен рентгенофлуоресцентный анализ с синхротронным излучением (РФА-СИ). Были определены концентрации: породообразующих К, Са, Ti, Mn, Fe, редких и рассеянных Ni, Cu, Zn, As, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ba, La, Се элементов. Проводилось сплошное сканирование недеформированного влажного керна с шагом в 0,5 и 1 мм [Zolotarev et al., 2001; Trunova et al., 2015].

Методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) в донных осадках определялись содержания 63 элементов [Жученко и др., 2008; Chebykin et al., 2015; Fedotov et al., 2015].

Определение содержания биогенного кремнезема, кварца, полевого шпата, органического углерода было выполнено методом ИК-спектроскопии с разрешением 1–0,5 см [Petrovskii et al., 2016].

Диатомовый анализ донных отложений приледниковых озер выполнялся согласно методике [Грачев и др., 1997]. Для определения изменения цветностных характеристик донных отложений был использован метод полуавтоматического анализа, комбинирующий анализ изображения и методы обработки сигналов [Ndiaye et al., 2012; ImageJ].

Статистическая обработка данных элементного анализа осуществлялась с помощью программы STATISTICA и программы R.

В работе датирование кернов было основано на хронологии ^{210}Pb , ^{137}Cs и ^{14}C . Измерение содержания ^{238}U , ^{234}Th , ^{226}Ra , ^{137}Cs и ^{210}Pb в исследуемых образцах проводилось с использованием метода полупроводниковой гамма-спектрометрии высокого разрешения согласно методикам [Melgunov et al., 2003; Gavshin et al., 2005]. Определение содержания радиоуглерода проводили на комплексе ускорительной масс-спектрометрии Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Для верхних слоев кернов, где это было возможно, глубинно-возрастные модели строились на основе подсчета количества годовых слоев.

Глава 4. Литолого-биогеохимический состав наземных и озерных отложений, сопряженных с деятельностью ледников

Изучены наземные разрезы Северного Байкала (мысы Лударь, Немнянка, Гуликан, Оргокон и Омагачан, г. Северобайкальск) содержащие ледниковые отложения. Литологические особенности, датирование торфяного прослоя и органического детрита из Томпудинской морены показало, что этот крупнейший ледниковый комплекс образовывался в два этапа.

Озера, расположенные на Байкальском хребте

Керн из озера Гитара (Gt-01/10) имел длину 83 см и представлен оливково-серыми алевропелитами возраста 5,65 тыс. л. н. На основе метода главных компонент в распределении элементного состава вдоль керна выделяются три геохимические группы.

Первая группа элементов представлена Ca, Ti, Fe, Cu, Zn, Y. Вторая группа элементов представлена K, Br, Rb, Zr, Mo, Th, U. Третья группа – Ca, Br, Sr, U. По характеру распределения элементов в донных отложениях оз. Гитара выделяются три периода (рис.1).

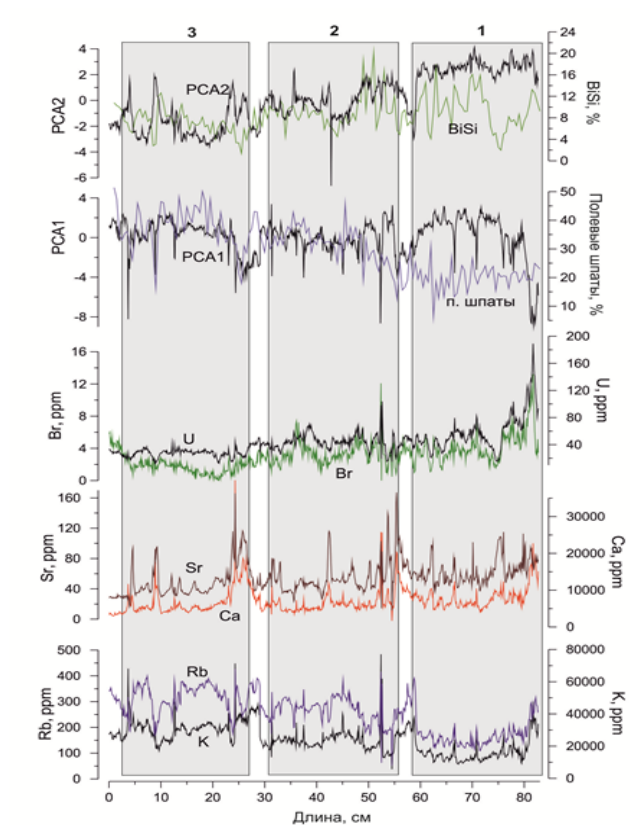


Рис. 1. Распределение элементного состава донных отложений оз. Гитара, биогенного кремнезема (BiSi), полевых шпатов. PCA-1,2 – оси нагрузок в методе главных компонент.

Элементный состав керна из оз. Изумрудное разделяется на две группы. В первую группу (описывает 60% варируемости элементов) входят высокоподвижные элементы (железо, калий, марганец, кальций) и элементы, характеризующие поступление кластогенного материала (титан, рубидий, иттрий, торий и другие). Вторая группа представлена медью, ураном, свинцом и молибденом. Выделяются четыре перехода (1800, 1910, 1940, 1990 гг.), когда изменения элементного состава были наиболее контрастными.

Озеро Эхой (Восточный Саян).

Керны донных отложений оз. Эхой представлены тонким переслаиванием алевропелитовых илов оливково-серого цвета с мелко-среднезернистым песком, мощностью от 1 до 7 мм. Сезонная слоистость выражена в чередовании слоев, содержащих темные минералы (лето) и светлых слоев, сложенных материалом пелитовой и мелкоалевритовой размерности. Элементный состав керна объединяется тремя группами. Группа 1 объединяет Ca, K, Ti, Fe и Mn. В группу 2 входят Ni, Cu, Br и U. Третья группа элементов включает в себя Rb, Sr, Zr, Nb, Y и Th (рис. 2.). Метод главных компонент и кластерного анализа профилей элементов по глубине керна позволил выделить пять переходов (1911, 1928, 1946, 1976 и 2000 гг.), когда изменения элементного состава были наиболее контрастными.

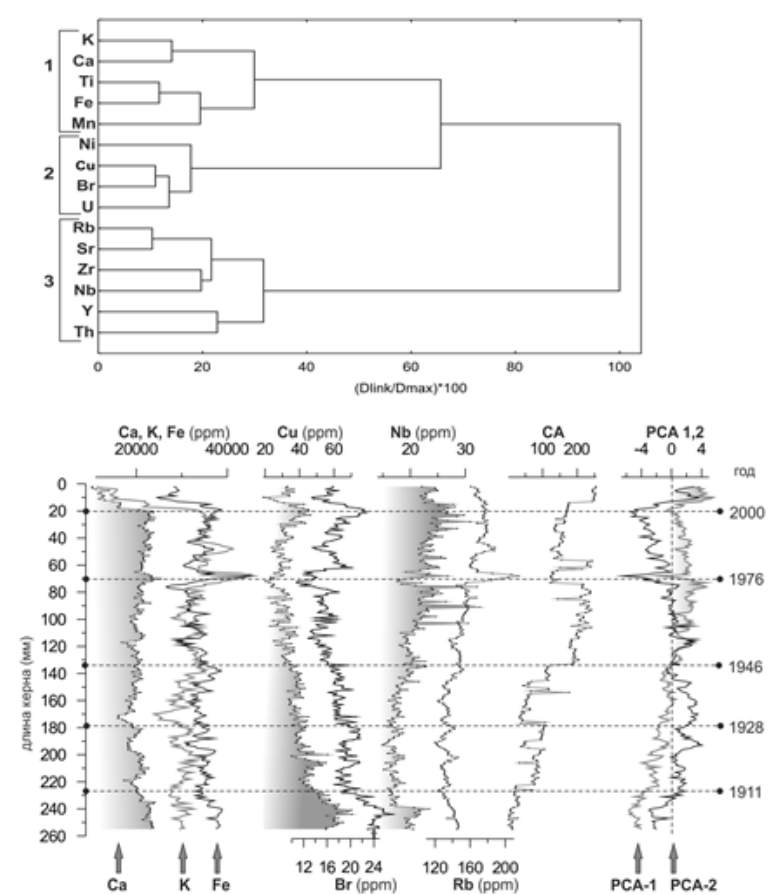


Рис. 2. Группирование элементов и изменение элементного состава верхней части керна Eh-01/13. CA – порядковое распределение интервалов керна по результатам кластерного анализа, PCA-1,2 – оси нагрузок метода главных компонент.

Озера Кодарского хребта

Керн Ug-01/14 (41 см) из оз. Угловое представлен темно-оливковыми алевропелитами. Основание керна (39–41 см) формировалось 5,06 тыс. л. н. Элементный состав описывается двумя группами элементов.

В первую группу (57% всей вариабельности элементного состава) входят практически все проанализированные элементы за исключением меди, брома и урана. Вторая группа описывает 17% всей вариабельности элементов. Наибольшую нагрузку в этой группе имеют бром, уран и рубидий. В накоплении элементов, как первой, так и второй группы, и параметров донных отложений, полученных методом ИК-спектроскопии отчетливо выделяются три периода (рис. 3).

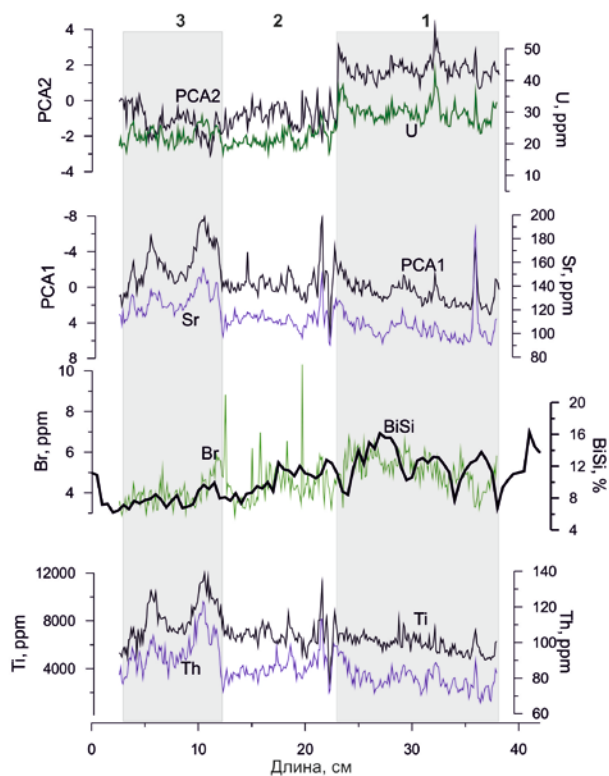


Рис. 3. Распределение элементного состава донных осадков оз. Угловое, биогенного кремнезема (BiSi). PCA-1,2 – оси нагрузок метода главных компонент.

Керн Az-01/14 из оз. Азаровой. Хотя длина керна всего 41 см его литологическое строение крайне контрастно. Нижний интервал керна 41–27 см сложен сизыми алевропелитами. Верхняя часть керна 22–0 см представлена коричневыми алевропелитами. Основание керна 38–40 см сформировано 11,73 тыс. лет назад. Первая группа описывает 49 % всей вариабельности распределения элементов, в группу не вошли Mn, Fe, Br, Zr, Nb. Вторая группа описывает 14% вариабельности распределения элементов, наибольшую нагрузку имеют Fe, Br, Zr, Nb, Sr. Третья группа описывает только 8% вариабельности распределения элементов. В группе наибольшую нагрузку имеет кальций.

Керн В.Pr-01/12 (31,5 см, 6,35 тыс. л. н) из оз. Большое Преображенское представлен светло-коричневыми алевропелитами. В первую геохимическую группу входят никель, медь, бром, иттрий, уран, торий, ниобий, молибден, свинец. Характер распределения Сорг и BiSi подобен распределению элементов первой группы (Cu, Br, Mo и U). Вторая группа представлена кальцием, титаном, бромом, молибденом, ураном. Третья группа представлена кальцием, титаном и медью. В геохимической летописи выделяются два периода с разным типом осадконакопления.

Озеро Орон. Первая геохимическая группа, описывающая 36% вариабельности, представлена K, Fe, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Mo, Th, U.

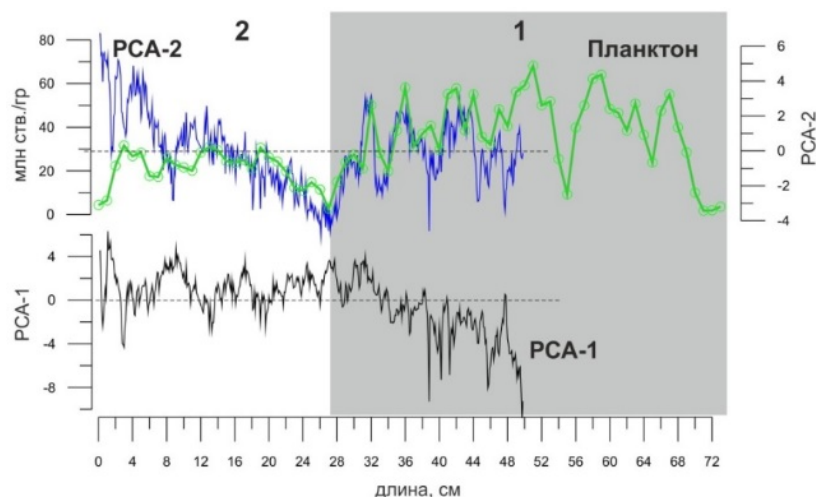


Рис. 4. Распределение первой и второй групп элементов и планктонных диатомей оз. Орон. PCA-1,2 – оси нагрузок в методе главных компонент.

Вторую группу составляют Ca, Ti, Cu, Br, Sr, Zr, Nb. Следует отметить насколько синхронно происходят изменения планктонных диатомей и элементов второй группы (рис.4).

В главе 5 рассматриваются биогеохимические аспекты формирования донных отложений прогляциальных озёр

Результаты многомерной статистики с разбиением на группы элементов по каждому из исследованных озёр, были скомпилированы в единую базу данных. Целью данной компиляции была отработка гипотез о наличии или отсутствии общих закономерностей в группировке элементов независимо от индивидуальных особенностей озёр.

На основе данного анализа выделяются три группы элементов со схожим распределением элементов в каждом проанализированном керне. Группу/поле 1 составляют элементы Nb, Rb, Zr, Th, Y, Pb, Sr. Группу/поле 2 формируют K, Ti, Ca, Mn, Fe. Группу/поле 3 составляют Br, Cu, Mo, U, Ni, Zn (рис. 5).

Большинство элементов первой группы (Nb, Rb, Zr, Th, Y) относятся к малоподвижным элементам в любых геохимических обстановках. Вероятнее всего, эти элементы поступают в донные отложения в составе кластического материала без серьезных дальнейших диагенетических преобразований. Интересно нахождение в этой группе стронция – элемента, хорошо мигрирующего во всех геохимических обстановках. Так стронций по своим химическим свойствам близок к рубидию и часто находится в одних и тех же минеральных ассоциациях, но рубидий хорошо мигрирует в кислых водах окислительной и восстановительно-глеевой обстановках. Этих обстановок сложно ожидать в условиях высокогорных ландшафтов. Таким образом, присутствие стронция именно в этой группе свидетельствует о слабом проявлении процесса химического выветривания в этих ландшафтах. И этот набор элементов может являться маркером интенсивного поступления «свежего», не выветренного материала в донные отложения.

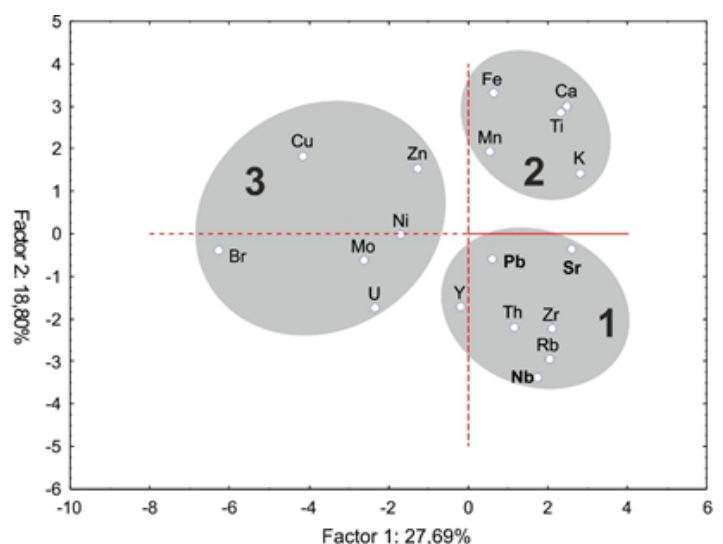


Рис. 5. Результаты использования метода главных компонент при анализе единой базы первых трех компонент для каждого из проанализированных озер. 1,2,3 группировка элементов.

По данным кластерного анализа, элементы этой группы наиболее тесно связаны с изменением летних температур и повышением скоростей осадконакопления (рис. 6).

Элементы второй группы Ca, K, Ti, Fe и Mn за исключением титана являются высокоподвижными элементами [Nesbitt et al., 1982; Gaillardet et al., 2003]. Групповая принадлежность титана, железа и марганца, в индивидуальных озерах не всегда однозначна. Например, в оз. Гитара титан входит и в первую и во вторую группу, и во вторую группу входит также Mn. Таким образом, это позволяет сделать предположение, что эта группа может являться маркером увеличения интенсивности процесса химического выветривания.

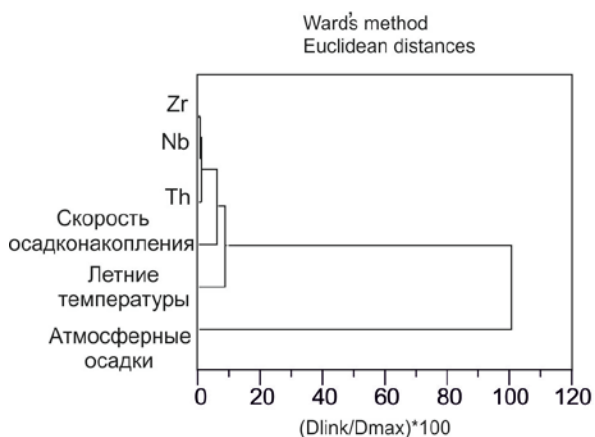


Рис. 6. Результаты кластерного анализа распределения некоторых элементов в донных осадках озера Эхой (РФА-СИ данные), региональная температура и атмосферные осадки [Stepanova et al., 2015].

Элементы Ni, Cu, Br, Mo, Zn и U, входящие в группу 3, очень часто образуют комплексные соединения с растворенным органическим веществом и могут интенсивно накапливаться в процессе жизненного цикла аквальной биоты. Распределение брома и урана вдоль кернов наиболее хорошо согласуются с распределением биогенного

кремнезема, органического углерода или диатомей. Вероятнее всего, эта группа элементов описывает интенсивность первичной биопродуктивности озера и распределение органической составляющей.

Таким образом, мы имеем три набора биогеохимических маркеров, описывающих поступление кластического материала в прогляциальные озера и развитие биоты в них.

Модель реконструкции динамики ледника на основе полученных геохимических данных разрабатывалась на примере ледника Перетолчина, поскольку для него известно несколько временных срезов, когда его нижняя граница смещалась, а летопись из донных отложений близка к годичному разрешению.

Поставку кластогенного материала в озеро тальми водами можно описать двумя состояниями ледника. Первое состояние – ледник «стационарен» т.е. незначительно или совсем не меняется в своей площади. В этом состоянии ледника происходит многократное размывание и переотложение пород водосбора без добавления «нового» материала, идет процесс химического выветривания, хотя и в сильно редуцированном виде. Вероятнее всего, маркерами этого состояния являются элементы второй группы. Второе состояние – ледник «подвижен», в этом состоянии идет интенсивное формирование «нового» материала за счет физического выветривания ложа ледника. В этих условиях распределение элементов первой группы наиболее близко «описывает» поступление в озеро тонкодисперсного материала продуцированного ледниковой эрозией.

Согласно инструментальным измерениям, нижняя граница ледника Перетолчина в 1897–1906 гг. была ~2776 м над ур. м., а в 2006–2008 гг. ~2925 м над ур. м., с ~1900 по 1963 гг. ледник отступил ~130 м вверх по склону, а с 1982 по 2008 гг. ~65 м (рис. 7). В общих чертах, наши данные согласуются с этими реперными хроно-срезами положения нижней границы ледника. Согласно полученным летописям, мы предполагаем, что интенсивная деградация ледника началась после 1920 года. Основываясь на том, что в эти эпизоды изменения содержания элементов первой группы были не столь значительны, а биопродуктивность озера была высокой, предполагается, что примерно до 1947 г. ледник интенсивно терял в своей мощности, но отступление его нижней границы было незначительным [Степанова и др., 2015]. Ледник начал интенсивно отступать с 1947 по 1970 гг., наиболее быстро этот процесс проходил ~1953–1970 гг. (рис. 7). В целом, период с 1938 по 1970 гг. характеризуется существенной потерей ледником своих объемов и существенным редуцированием его границ. Следующий период устойчивой деградации ледника начался с 1980 по 2000 гг.

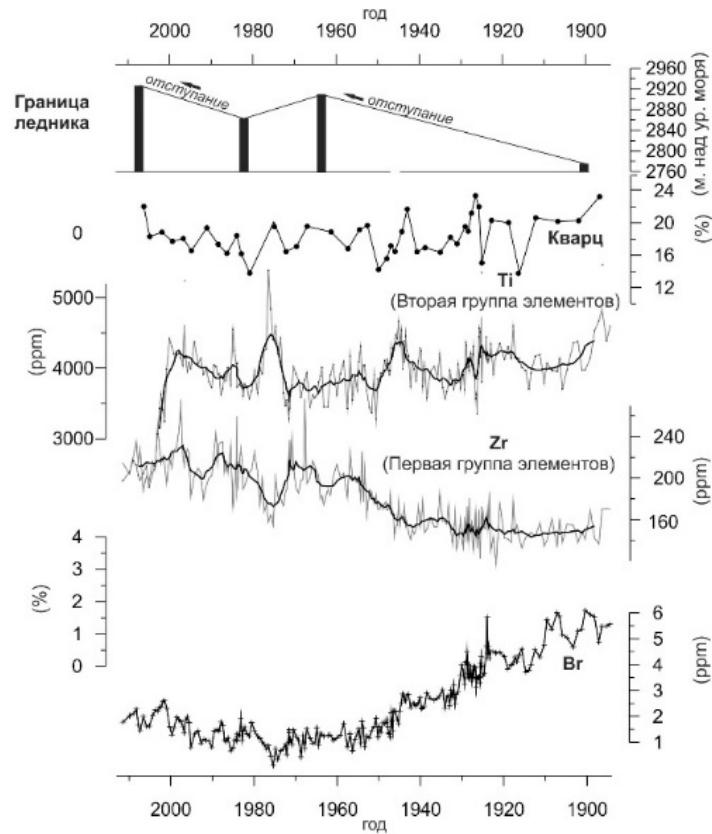


Рис. 7. Изменение положения нижней границы ледника Перетолчина в сравнении с распределением элементов 1,2,3 – групп.

Диатомовые летописи прогляциальных озер и непрогляциальных оказались во многом схожи. Отмечается тренд снижения численности диатомей от Малого ледникового периода к Современному потеплению (рис. 8). В малых озерах первого типа основным фактором, определяющим развитие фитопланктона этих озер, является мутность воды. Когда большое количество взвешенного тонкодисперсного кластогенного материала оказывает негативное влияние на развитие диатомей. При этом интенсивность поставки терригенного материала в озеро находилась в прямой зависимости от динамики таяния ледников.

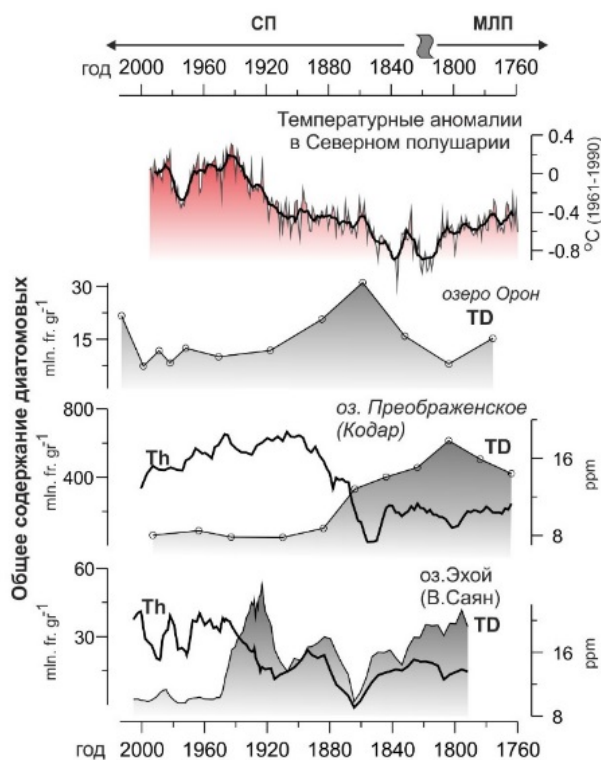


Рис. 8. Обратная зависимость между распределением диатомей (TD-серая заливка), поступлением тонкодисперсного материала (выраженного через содержание Th) в приледниковые озера с глобальными изменениями температур от Малого ледникового периода до Современного потепления.

Отклик фитопланктона непрогляциальных озер более сложен. Например, в озере Орон наблюдается снижение численности диатомей *Cyclotella*-complex, начиная с 1880-х годов [Vogobueva et al., 2015; Федотов и др., 2016]. Можно предположить, что драматическое снижение количества диатомовых после 1990-х годов в подобных озерах было вызвано интенсивным притоком талых вод, обедненных питательными компонентами.

Глава 6. Реконструкция динамики ледников Восточной Сибири в позднплейстоцен-голоценовый период

Финальная часть позднплейстоценового оледенения рассматривается на примере Томпудинской морены. Так формирование Томпудинской морены шло в два этапа. Первый этап формирования маломощного слоя ледниковых отложений, вероятно, произошел вследствие так называемого потепления Бёллинг–Аллерёд. Затем, в эпизод похолодания (Поздний Дриас) около 11,8–12,4 тыс. л. н. на поверхности морены сформировались сингенетические озерно-болотные торфяные отложения. Основная толща морены сформировалась, примерно, 9–11 тыс. л. н. и перекрыла торфяные отложения.

История формирования разреза донных отложений оз. Азаровой также свидетельствует о том, что к переходу Поздний Дриас – голоцен ледники Кодарского хребта или стояли полностью или сократились до размеров близких к современным. Так, основание керна с оз. Азаровой уже сформировалось около 12 тыс. л. н. в условиях озерного седиментогенеза.

Примечательно формирование схожего Fe-Mn прослоя в донных отложениях озер Азаровой и Большое Преображенское около 5,6 тыс. л. н. Формирование такого

прослая свидетельствует, что скорости осадконакопления резко замедлились. Снижение скоростей осадконакопления может быть объяснено низкой интенсивностью поступления терригенно-биогенного материала в акваторию этих озер. В условиях высокогорья Кодарского хребта это было вызвано снижением периода «открытой воды» этих озер в результате похолодания. На основе высокого содержания маркеров биологической продуктивности (биогенного кремнезема, брома, планктонных диатомей) можно предположить, что период с 5,2–3,2 тыс. л. н. характеризуется высокой биопродуктивностью озер Гитара, Угловое, Азаровой, Б. Преображенское.

В целом, временной интервал 0–3 тыс. л. н. по климатическим параметрам был подходящим для формирования малых ледников в регионе. Начиная с трех тысяч лет назад, отмечается устойчивый тренд повышения содержания терригенной составляющей в донных отложениях (рис. 9). Хотя возникает вопрос – хватило бы этим ледникам запаса ледниковой мощности чтобы не растаять, в эпизодах повышения летних температур, около 2,5–3 тыс. л. н. (Римский оптимум) и потепление Средневековья (~750–950 гг.).

В эти эпизоды поступление аллохтонного материала снижалось особенно контрастно в оз. Гитара (рис. 9). С другой стороны, в пользу того, что современным ледникам не предшествовали другие ледники, является то, что маркеры внешней границы ледника – конечные моренные валы, которые могли свидетельствовать о границах ледника, существенно отличных от современных, не обнаруживаются визуально между изученными озерами и современными ледниками.

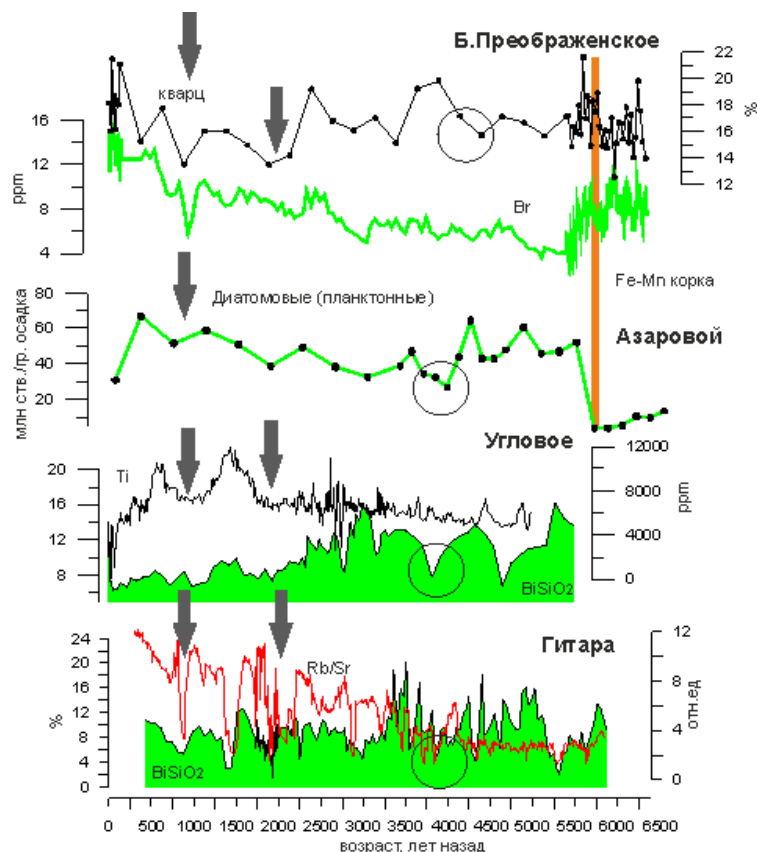


Рис. 9. Распределение биогенно-геохимических и минералогических маркеров в кернах из озер Байкальского и Кодарского хребтов. Круг – период аридизации, широко проявленный в разных региональных палеолетописях Северного и Южного полушария.

Стрелки – Римский климатический оптимум (около 2 тыс. л. н.) и Средневековое потепление (около 1 тыс. л. н.).

Таким образом, современные ледники, наблюдаемые сейчас, сформировались в течение Малого ледникового периода.

В изменении содержаний элементного состава также наблюдались короткопериодические колебания поступления кластогенных элементов в прогляциальные озера Эхой и Изумрудное во время Современного потепления (рис. 10). Было три эпизода, когда и в Европе и в Восточной Сибири эти осцилляции доминировали – 1860, 1950 и 1990 гг. Эти эпизоды характеризуются изменением баланса массы ледников и увеличением летних температур воздуха. Для последних 210 лет можно выделить три периода в динамике изученных ледников.

Первый период с 1800 по 1890 гг. Поставка суспензионного материала тальми водами ледника Перетолчина в оз. Эхой не была интенсивной вплоть до 1850 г., а в оз. Б. Преображенское вплоть до 1875 г. Кроме того, отклик Кодарских ледников в этом интервале был более интенсивным, чем отклик ледника Перетолчина (рис. 10). Интенсивное таяние ледников Кодарского хребта началось с 1900 г. Скорость поступления талых вод в озеро Изумрудное (Байкальский хребет) была высокой в течение Малого ледникового периода и уменьшилась при переходе от МЛП к СП (рис. 10.).

Второй период с 1890 по 1940 гг. Поступление талых вод в озера Изумрудное и Эхой резко уменьшилось, а для оз. Б. Преображенское стало умеренным. Даже резкое увеличение региональных атмосферных осадков в 1910–1920 гг. не повлияло на увеличение поступления кластогенного материала в прогляциальные озера (рис. 10). Это показывает, что региональный баланс массы ледников был, вероятнее всего, положительным.

Третий период с 1940 г. по настоящее время. Изменения элементного состава не показали резкого увеличения поступления кластогенного материала в оз. Б. Преображенское в течение последних 50 лет, кроме того, интенсивность этой поставки уменьшилась (рис. 10). Согласно нашим данным эти ледники умеренно таяли в этот период. Поступление талых вод ледника горы Черского в озеро Изумрудное постепенно увеличивается в течение третьего периода. Ледник Перетолчина (Восточный Саян) демонстрировал высокие скорости таяния и изменения его границ. Скорость таяния ледника Перетолчина резко уменьшилась с 2002 г., хотя всё ещё остается высокой.

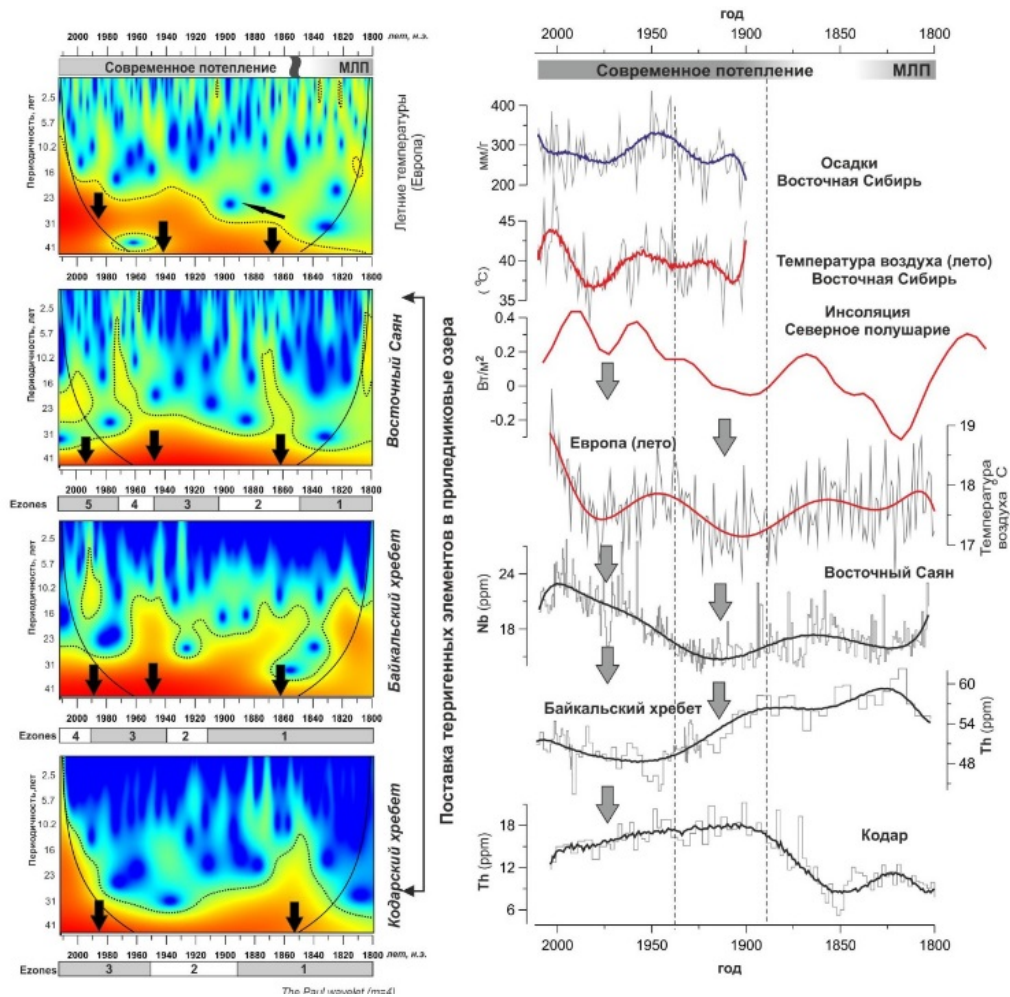


Рис. 10. Левая панель – периодичность поступления терригенного материала на основе вейвлет преобразования. Серые стрелки – проявление короткопериодических колебаний в изменениях летних температур. Правая панель – связь между содержанием элементов первой группы в прогляциальных озерах, инсоляцией в Северном полушарии и региональными климатическими параметрами [http://climate.geog.udel.edu], серые стрелки – эпизоды уменьшения летних температур, вертикальные пунктирные линии – три периода в динамике ледников за последние 210 лет.

Полученные в ходе выполнения диссертационной работы материалы позволяют сделать следующие выводы:

1. В распределении элементного состава проанализированных кернов выделяются геохимические группы элементов (Br, Cu, U, Mo) являющихся маркерами биогенной продуктивности озер и ассоциированных с распределением биогенного кремнезема, органического углерода и планктонных диатомей. Увеличение содержания Ca, K, Ti, Fe и Mn отображает поступление кластогенного материала в озеро, когда ледник находится в «стационарном» положении без интенсивного смещения его переднего края. Высокие содержания Rb, Sr, Zr, Nb, Y и Th, как правило, ассоциируются с развитием процесса ледниковой экзарации его ложа, и изменениями в летних температурах.

2. Наблюдается отчетливая обратная взаимосвязь между интенсивным движением ледника и биопродуктивностью прогляциальных озер. В прогляциальных озерах, наполнение озер тонкодисперсным веществом – «ледниковым молоком» увеличивает

мутность его вод, что существенным образом угнетает его биологическую продуктивность. В удаленных от ледников озерах поставка низкоминерализованных талых вод также негативно сказывается на их биопроductивности.

3. К 12 тыс. лет назад начался процесс озерного седиментогенеза на Кодарском хребте, позднеплейстоценовые ледники полностью растаяли к этому времени. Моренные отложения Томпудинского ледника формировались до рубежа в 9 тыс. лет назад.

4. Около 5,8 тыс. лет назад в региональном климатическом режиме, был короткий эпизод похолодания, в результате чего, период «открытой воды» на водосборной территории Кодара, сократился до минимальной продолжительности не более месяца.

5. Наиболее подходящие климатические условия для формирования современных ледников юга Восточной Сибири были в течение последних 3 тыс. лет. Однако регистрируются кратковременные эпизоды аридизации климата, хронологически совпадающие с периодами так называемых потеплений – Римский климатический оптимум (около 2 тыс. лет назад) и Средневековое потепление (около 1 тыс. лет назад). В результате чего данные ледники растаяли. Наблюдаемые сейчас ледники сформировались в течение Малого ледникового периода.

6. За последние 210 лет в динамике ледников изучаемой территории выделяется три периода. Первый период (1800–1890 гг.) – в ответ на Современное потепление, поставка ледниковой терригенной взвеси была не интенсивной в озера Восточного Саяна и Кодара, но высокой для озер Байкальского хребта. Баланс массы ледников был положительным во второй период (1890–1940 гг.). В третий период (1940–2015 гг.) ледники Кодарского и Байкальского хребтов показывали умеренную степень деградации, в то время как ледник Перетолчина (Восточный Саян) наивысшую. Начиная с 2000-х годов, скорость дегляциации ледников юга Восточной Сибири замедлилась.

Список публикаций по теме диссертации:

1. **Степанова О.Г.**, Трунова В.А., Сидорина А.В., Зверева В.В., Мельгунов М.С., Петровский С.К., Крапивина С.М., Федотов А.П. Исследования донных осадков прогляциального озера Эхой (Восточный Саян) методом РФА-СИ // Известия РАН. Серия «Физическая». – 2015. – Т. 79. – №1. – С. 132–136.
2. Trunova V.A., **Stepanova O.G.**, Zvereva V.V., Sidorina A.V., Melgunov M.S., Petrovskii S.K., Rakshun Ya.V., Fedotov A.P. Tracing recent glacial events in bottom sediments of a glacial lake (East Sayan Ridge, Russia) from high-resolution SR-XRF, ICP-MS, and FTIR records // X-Ray Spectrometry. – 2015. – V. 44. – P. 255–262.
3. **Stepanova O.G.**, Trunova V.A., Zvereva V.V., Melgunov M.S., Fedotov A.P. Reconstruction of glacier fluctuations in the East Sayan, Baikalsky and Kodar Ridges (East Siberia, Russia) during the last 210 years based on high-resolution geochemical proxies from proglacial lake bottom sediments // Environmental Earth Sciences. – 2015. – V. 74. – P. 2029–2040.
4. Fedotov A.P., Trunova V.A., Enushchenko I.V., Vorobyeva S.S., **Stepanova O.G.**, Petrovskii S.K., Melgunov M.S., Zvereva V.V., Krapivina S.M., Zheleznyakova T.O. A 850-year record climate and vegetation changes in East Siberia (Russia), inferred from geochemical and biological proxies of lake sediments // Environmental Earth Sciences. – 2015. – V. 73. – P. 7297–7314.
5. Vorobyeva S.S., Trunova V.A., **Stepanova O.G.**, Zvereva V.V., Petrovskii S.K., Melgunov M.S., Zheleznyakova T.O., Chechetkina L.G., Fedotov A.P. Impact of glacier changes on ecosystem of proglacial lakes in high mountain regions of East Siberia (Russia) // Environmental Earth Sciences. – 2015. – V. 74. – P. 2055–2063.

6. **Степанова О.Г.**, Трунова В.А., Зверева В.В., Мельгунов М.С., Петровский С.К., Крапивина С.М., Федотов А.П. Реконструкция динамики ледника Перетолчина (Восточный Саян) в XX веке на примере изучения донных осадков прогляциального озера Эхой // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – № 9. – С. 1621–1629.
7. Petrovskii S.K., **Stepanova O.G.**, Vorobyeva S.S., Pogodaeva T.V., Fedotov A.P. The use of FTIR methods for rapid determination of contents of mineral and biogenic components in lake bottom sediments, based on studying of East Siberian lakes // Environmental Earth Sciences. – 2016. – 75:226.
8. Федотов А.П., Воробьева С.С., Бондаренко Н.А., Томберг И.В., Жученко Н.А., Сезько Н.П., **Степанова О.Г.**, Мельгунов М.С., Иванов В.Г., Железнякова Т.О., Шабурова Н.И., Чечеткина Л.Г. Влияние природных и антропогенных факторов на развитие удаленных озер Восточной Сибири за последние 200 лет // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 2. – С. 394–41.
9. **Степанова О.Г.**, Сидорина А.В. Реконструкция параметров дегляциации ледника Перетолчина (Восточный Саян, Восточная Сибирь) с шагом год-десятилетие, на основе расшифровки биогеохимических сигналов из донных осадков приледникового озера и геоморфологических наблюдений // Виртуальные и реальные литологические модели. Материалы 10 Уральского литологического совещания. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2014. – С.175–177.
10. **Stepanova O.**, Trunova V., Zvereva V., Melgunov M., Vorobyeva S., Fedotov A. Reconstruction of glacier fluctuations in the East Sayan, Baykalsky and Kodar ridges (East Siberia, Russia) during the last 200 years based on high-resolution geochemical proxies from proglacial lake bottom sediments // Paleolimnology of Northern Eurasia. Proceedings of the International Conference. Petrozavodsk, 21–25 of September 2014 / Eds. Dmitry Subetto, Tatyana Regerand, Anastasiya Sidorova. Petrozavodsk: Karelian Research Centre RAS, 2014. – P. 108.
11. **Степанова О.Г.**, В.А. Трунова, В.В. Зверева, А.В. Сидорина, А.П. Федотов. Реконструкция динамики ледника Перетолчина (Восточный Саян) в XX веке на примере изучения донных осадков прогляциального озера Эхой // XX Национальная конференция по использованию Синхротронного Излучения «СИ-2014». Новосибирск, 7–10 июля 2014 г. Новосибирск, 2014. – С. 91.
12. **Степанова О.Г.**, Трунова В.А., Зверева В.В., Мельгунов М.С., Федотов А.П. Реконструкция динамики ледников в Восточном Саяне, Байкальском и Кодарском хребтах (Восточная Сибирь, Россия) за последние 210 лет на основе расшифровки высокоразрешающих геохимических летописей донных осадков приледниковых озер // Шестая международная Верещагинская Байкальская конференция. Иркутск, 7–12 сентября 2015 г. Иркутск, 2015. – С. 205–206.
13. **Степанова О.Г.**, Трунова В.А., Зверева В.В., Мельгунов М.С., Федотов А.П. Изучение донных отложений приледниковых озер с целью реконструкции динамики ледников Восточной Сибири за последние 210 лет // Материалы международной молодежной научно-практической конференции «Россия-Монголия». Иркутск, 16–21 мая 2016 г. Иркутск, 2016. – С. 122–124.
14. **Степанова О.Г.**, Трунова В.А., Воробьева С.С., Осипов Э.Ю., Мельгунов М.С., Петровский С.К., Крапивина С.М., Железнякова Т.О., Енущенко И.В., Вершинин К.Е., Пархомчук Е.В., Растигеев С.А., Петрожицкий А.В., Федотов А.П. Реконструкция динамики малых ледников Восточной Сибири в голоцене на основе изучения донных отложений приледниковых озер // Международная конференция «Пресноводные экосистемы – современные вызовы». Иркутск, 10–14 Сентября, 2018. Иркутск: ЛЛС «Мегапринт», 2018. – С. 326–327.

15. **Stepanova O.G.**, Trunova V.A., Vorobyeva S.S., Osipov E.Yu., Melgunov M.S., Petrovskii S.K., Krapivina S.M., Zheleznyakova T.O., Enushchenko I.V., Vershinin K.E., Parhomchuk E.V., Rastigeev S.A., Petrozhitsky A.V., Fedotov A.P. Paleoclimate records of the Holocene inferred from proglacial lake bottom sediments of East Siberia // Proceedings of the 3-rd International Conference: «Paleolimnology of Northern Eurasia: Experience, Methodology, Current Status». Kazan, 1–4 of October 2018. Kazan: Publishing House of Kazan University, 2018. – P. 118–119.