

Списки содержания доступны на [сайте ScienceDirect](http://www.elsevier.com/locate/quascirev)

## Обзоры четвертичной науки

Домашняя страница журнала: [www.elsevier.com/locate/quascirev](http://www.elsevier.com/locate/quascirev)

## Изменения растительности, климата и озер за последние 7000 лет на бореальной границе леса в северо-центральной части Сибири

Джулиана Клемм а, б, \*, Ульрике Герцшу а, б, Людмила Александровна Пестрякова <sup>с</sup><sup>а</sup> Институт Альфреда Вегенера, Центр полярных и морских исследований имени Гельмгольца, Отдел перигляциальных исследований, Телеграфенберг А 43, 14473 Потсдам, Германия<sup>б</sup> Институт наук о Земле и окружающей среде, Потсдамский университет, Karl-Liebknecht-Straße 24-25, 14476 Potsdam-Golm, Германия<sup>с</sup> Кафедра географии и биологии, Северо-Восточный федеральный университет, ул. Белинского, 58, 67700 Якутск, Россия

## информация о статье

## История статьи:

Получено 8 апреля 2015 г.

Получено в переработанном виде

24 июля 2015 г.

Принято 6 августа 2015 г.

Доступно онлайн 24 августа 2015 г.

## Ключевые слова:

Тундрово-тайжный экотон

Лиственница Гмелина

Палинология

Геохимия осадков

Средняя температура июля

Рукоположение

WA-PLS

Прокрустово вращение

## абстрактный

Палеоэкологические исследования в экотоне лиственничного леса-тундры на севере Сибири имеют потенциал для выявления изменений окружающей среды голоцена, которые, вероятно, имеют последствия для глобального изменения климата из-за сильных механизмов обратной связи в высоких широтах. Керна осадка, собранный из небольшого озера (радиус ~100 м), использовался для реконструкции развития озера и его водосбора, а также растительности и летних температур за последние 7100 калиброванных лет. Был применен многопрокси-подход, включающий пыльцевой и седиментологический анализы. Наши данные указывают на постепенную замену открытых лиственничных лесов тундрой с разбросанными одиночными деревьями, которые сегодня встречаются в окрестностях озера. Общая тенденция похолодания летней температуры от ~2 °C теплее, чем сейчас, летних температур в середине голоцена до установления современных условий около 3000 лет назад реконструирована на основе региональной функции переноса пыли и климата. Вывод о региональных изменениях растительности сравнивался с локальными изменениями в водосборе озера. Первоначальная небольшая водная депрессия произошла между 7100 и 6500 кал. лет до н.э. После этого образовалось и углубилось небольшое озеро, вероятно, из-за термокарстовых процессов.

Хотя общие тенденции локальных и региональных изменений окружающей среды совпадают, изменения водосбора озера демонстрируют более высокую изменчивость. Более того, изменения водосбора озера немного опережают изменения в региональной растительности. Оба косвенных показателя подчеркивают, что в экотоне сибирской лесотундры в течение голоцена произошли заметные изменения окружающей среды.

© 2015 Elsevier Ltd. Все права защищены.

## 1. Введение

Глобальная тенденция к потеплению особенно выражена в арктическом регионе как следствие полярного усиления (Serreze et al., 2009; Bekryaev et al., 2010; Hinzman et al., 2013) и, как ожидается, ускорится в будущем в самой северной части Сибири, особенно вокруг полуострова Таймыр (IPCC, 2013). Для обоснования этого прогноза полезно интерпретировать реконструкции из прошлого с похожими пространственными моделями, но для северной Сибири доступно мало количественных климатических реконструкций.

Реконструкция прошлого климата требует понимания того, как климатический прокси-сервер временно и пространственно связан с изменением климата. Из текущих изменений окружающей среды, которые мы уже знаем

что сроки и сила воздействия различных компонентов арктических экологических систем на климатические изменения чрезвычайно изменчивы (Лентон, 2012; Хинцман и др., 2013; Пирсон и др., 2013).

Например, гидрологические изменения в вечномерзлых озерах могут быть резкими, но направление изменений может быть различным локально, например, повышение уровня озера в одном месте и увеличение оттока в соседнем месте (Brouckov et al., 2004; Smith et al., 2005; van Huissteden et al., 2011; Morgenstern et al., 2011; Kanevskiy et al., 2014; Turner et al., 2014). Соответственно, косвенные признаки гидрологических изменений в термокарстовых озерах могут реагировать немедленно, но изменение не линейно связано с климатом. С другой стороны, изменение растительности в ответ на изменение климата может быть постепенным, т. е. миграция видов на север и расширение бореальных лесов во время потепления (Наурызбаев и Ваганов, 2000; Элмендорф и др., 2012a,b; Бернер и др., 2013; МГЭИК, 2013). Этот ответ на изменение климата может быть последовательным на больших территориях, но его реакция может быть замаскирована на региональном уровне (Сидорова и др., 2009; Гизеке и др., 2011; Чебакова и Парфенова, 2012; Харук и др., 2013). На границе леса в Сибири наиболее разумными сценариями являются передовые растительно-климатические

\* Автор-корреспондент. Институт Альфреда Вегенера, Центр Гельмгольца по полярным и морским исследованиям, Отделение перигляциальных исследований, Телеграфенберг А 43, 14473 Потсдам, Германия.

Адрес электронной почты: [Juliane.Klemm@awi.de](mailto:Juliane.Klemm@awi.de) (Й. Клемм).

неравновесие в периоды потепления климата из-за ограниченных темпов миграции лиственницы и неравновесие задней кромки из-за стойкого леса, несмотря на холодный климат. Это указывает на то, что необходимо собрать разумный ансамбль экологических переменных для контроля неопределенностей, возникающих из-за различных масштабов, в которых происходят процессы.

Непрерывные записи изменений окружающей среды в масштабе тысячелетия в северной Сибири лучше всего получать из озерных отложений, которые можно исследовать по различным параметрам. Здесь мы представляем результаты палинологического и седиментологического анализа керн озерных отложений с юга полуострова Таймыр (северная Сибирь), охватывающего ~7100 кал. лет до настоящего времени. Поскольку пыльца по-прежнему является одним из самых надежных климатических прокси, доступных для региона, мы предоставляем реконструкцию климата на основе пыльцы и оцениваем полученные результаты в связи с локальными гидрологическими изменениями, выведенными из седиментологических и геохимических параметров.

## 2. Региональные условия

Район реки Хатанга является частью северной Сибирской низменности и расположен между полуостровом Таймыр на севере и плато Путорана на юге, политически относясь к Красноярскому краю России. Водосборный бассейн изученного озера подстилается мощными терригенными и вулканическими отложениями, которые богаты смектитом, происходящим из базальтов Сибирских траппов плато Путорана (Wahsner et al., 1999; Petrov, 2008; Vernikovskiy et al., 2013). Вышележащие четвертичные перигляциальные и, в некоторой степени, озерно-аллювиальные отложения имеют преимущественно путоранское происхождение

и, следовательно, базальтовый (Перегович и др., 1999; Шахгеданова и др., 2002). Сообщается, что наносы в реке Хатанга содержат до 80% монтморинолитового глинистого минерала смектита (Рахольд и др., 1997; Детлефф и др., 2000). Ландшафт низменности однородный с низким рельефом. Регион, вероятно, не был или был только локально покрыт оледенением во время последнего ледникового максимума, но был расположен между ледниками гор Таймыра и Путорана, следовательно, преобладали перигляциальные условия (Свендсен и др., 2004; Элерс и Гиббард, 2007). Регион контролируется сплошной, очень глубокой вечной мерзлотой со средним содержанием подземного льда до 20% по объему (Schirrmeister et al., 2013; Brown et al., 2014), там находятся многочисленные озера (Ананьева и Пономарева, 2001).

Региональный климат определяется полярным фронтом, который зимой располагается вблизи побережья Северного Ледовитого океана. Летом регион находится в пределах арктического фронта. Преобладающие ветры дуют с северо-запада и юго-востока (Трешников, 1985; MacDonald et al., 2000b; Pospelova et al., 2004). Субарктический климат региона континентальный, с коротким и мягким летом со средней температурой июля около 12,5 °C и суровой зимой со средней температурой января ~-31,5 °C. Годовое количество осадков небольшое, около 250 мм, причем большая часть осадков выпадает летом с июня по сентябрь. Снежный покров держится от 180 до 260 дней при высоте слоя до 80 см (Григорьев и Соколов, 1994; климатическая станция, основанная в г. Хатанга в 1934 г., <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/20891.htm>).

Растительность региона представляет собой южную окраину кустарниковой тундры и представляет собой мозаику типов растительности.

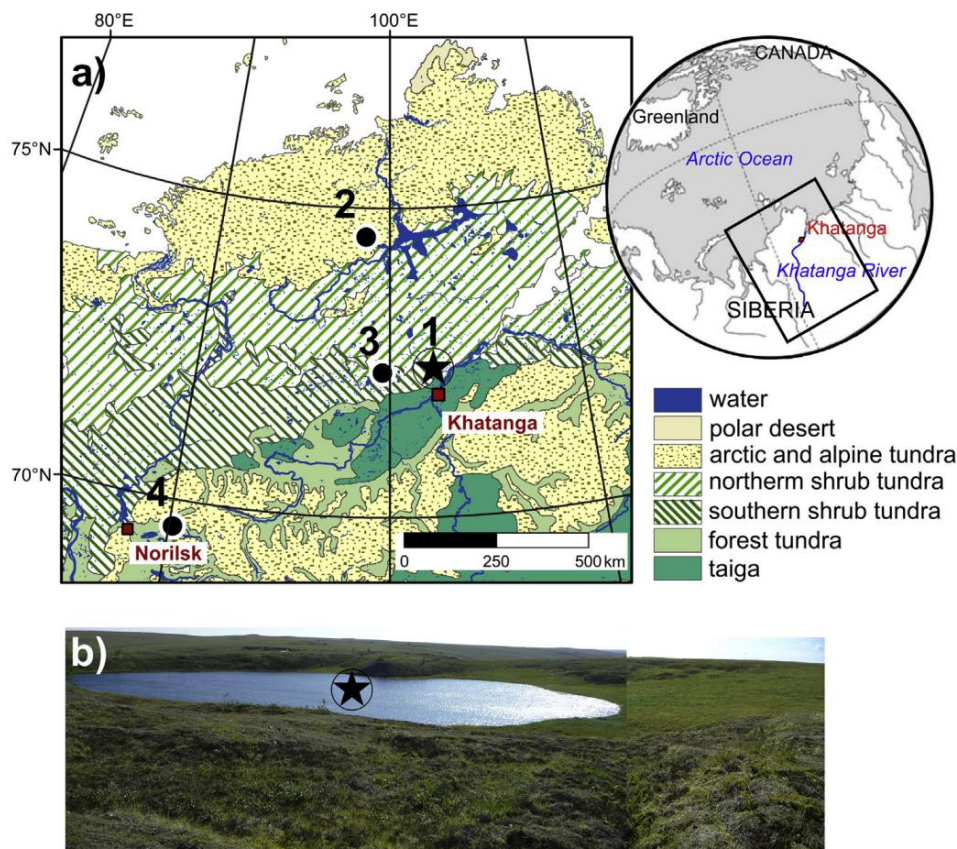


Рис. 1. Расположение исследуемого региона в пределах Сибирской Арктики: а) Карта региона Таймыра с расположением озера СН-12 (1; звезда), городов Хатанга и Норильск и других исследуемых озер: озера Левинсона-Лессинга (2), озера Лабаз (3) и озера Лама (4). Указаны современные зоны растительности по Стоуну и Шлезингеру (1993). б) Озеро СН-12, размером около 200 x 150 м, с отмеченным местом взятия керн. Также видны водно-болотные угодья, в которых преобладают осоки и кустарники Salix на восточном конце озера (напротив оттока).

(Stone и Schlesinger, 1993; Юрцев, 1994; CAVM Team, 2003) со сплошным растительным покровом, но местами, например, на более сухих вершинах холмов, может встречаться голая почва (Чернов и Матвеева, 1997).

Ярус мхов обширен и имеет толщину не менее 10 см. Наиболее многочисленны роды Sphagnum, Hylocomium, Aulacomnium, Dicranum и Polytrichum. Травянистый и кустарничковый ярус достигает высоты до пятидесяти сантиметров. Доминируют осоки, такие как виды Eriophorum и Carex, и кустарники, особенно Ledum palustre, виды Vaccinium, Betula nana и A. viridis subsp. fruti-cosa. Эта кустарниковая тундра усеяна зарослями Larix gmelinii (Абаимов, 2010). В этом районе самые северные «лесные острова», так называемые Ары-Мас, произрастают на севере до 72560 с.ш. (Блисс, 1981; Тишков, 2002). Основным видом антропогенного воздействия в районе реки Хатанга является коммерческое оленеводство, которое активизировалось с 1960-х годов (Павлов и др., 1996).

Место исследования расположено на 72.40 с.ш. и 102.29 в.д.; 60 м над уровнем моря. Небольшое озеро, получившее техническое название CH-12d, имеет эллиптическую форму с площадью поверхности около 2,4 га и средним радиусом 100 м (рис. 1). Его максимальная глубина составляет 14,3 м. Озеро расположено в замкнутой котловине на низменном плато в северных низинах. Оно не имеет притоков, но дренирует окружающие хребты. Один небольшой отток присутствует на его западной стороне, впадая в реку Новая, которая является одним из главных притоков реки Хатанга. Наши исследования растительности в пределах водосбора показали, что в южной кустарниковой тундре доминируют кустарнички Ericaceae (Cassiope tetragona, Vaccinium vitis-idaea и V. uliginosum), в то время как B. nana и Alnus fruticosa встречаются реже и достигают лишь небольшой высоты роста (<20 см). Salix spp. произрастают преимущественно вдоль береговых линий рек и озер. Сугерасеае и Роасеае, а также травы, такие как Dryas octopetala ssp. punctata, встречаются в изобилии. На этой территории встречаются отдельные участки деревьев L. gmelinii высотой до 5 м.

### 3. Материалы и методы

#### 3.1 Сбор материала

Полевые работы проводились в рамках совместной российско-германской экспедиции в Хатангский район в 2011 году. Отбор проб производился в центральной точке озера на глубине 14,3 м, где был установлен керн длиной 131,5 см с гравитационным пробоотборником UWITEC, дополненным ударным действием. Керн был подвыбран в Германии в лаборатории Института Альфреда Вегенера (AWI). Для точной оценки скорости седиментации исследуемого озера был получен параллельный короткий керн длиной 32 см, который был нарезан на образцы толщиной 0,5 см в полевых условиях.

#### 3.2 Определение возраста

Верхние 10 см короткого керна были высушены замораживанием и отправлены на радиометрическое датирование свинца и цезия в Центр исследований радиоактивности окружающей среды Ливерпульского университета, Великобритания (Appleby et al., 1991; Appleby, 2001). Кроме того, материал (мох, остатки древесины или листьев или объемный осадок) из пятнадцати образцов был высушен замораживанием и отправлен в Познаньскую радиоуглеродную лабораторию, Польша, для радиоуглеродного датирования. Модель возраста-глубины была установлена с использованием пакета Bacon (Blaauw и Christen, 2011) в среде R версии 3.02 (R Core Team, 2013), в которой калиброванные возрасты до настоящего времени (кал. годы BP) основаны на IntCal13 (Reimer et al., 2013).

#### 3.3. Анализ пыльцы

Для анализа пыльцы было отобрано 65 образцов ископаемых осадков объемом 1,5 мл с помощью пластиковых шприцев и подготовлено в соответствии со стандартной процедурой (Fægri and Iversen, 1989, Klemm et al., 2013). Окончательный вариант

образцы были помещены в безводный глицерин и исследованы при увеличении 400. Таксономическое определение пыльцы было основано на региональной справочной коллекции и стандартной литературе (Moore et al., 1991; Reille, 1998; Blackmore et al., 2003; Beug, 2004; Savelieva et al., 2013). Типы пыльцы указаны в тексте ЗАГЛАВНЫМИ буквами, чтобы облегчить дифференциацию ТАКСОНОВ ПЫЛЬЦЫ и таксонов растений (Joosten and de Klerk, 2002). Для каждого образца было подсчитано не менее 500 наземных пыльцевых зерен. Непыльцевые палиноморфы, такие как устьица хвойных (Hansen, 1995), были подсчитаны вместе с пыльцевыми зернами.

#### 3.4. Седиментологические (геохимические и гранулометрические) анализы

В записи не было никаких признаков перерывов. На глубине 109–111 см осадок был смещен, возможно, из-за процесса отбора керна, но потери материала не было отмечено ни в полевых, ни в лабораторных исследованиях. Описание керна следует за первоначальными анализами и результатами сканирования изображений. Керн осадка был открыт в лаборатории AWI в Потсдаме, и одна половина была напрямую перевезена в лабораторию AWI в Бремерхафене для выполнения линейного сканирования с использованием сканера XRF Aavatech с использованием рентгеновской трубки Rh при 1 мА и времени счета 10 с при 10 кВ без фильтра и при 30 кВ для более тяжелых элементов с фильтром «PD thick». Разрешение каротажа было установлено на 5 мм. В этом исследовании представлены геохимические результаты подсчетов алюминия, титана, кремния, рубидия, стронция, брома, железа и марганца (252 наблюдения). Для статистического анализа мы использовали логарифмические отношения элементов (Weltje и Tjallingii, 2008).

Относительно тяжелый элемент титан показал стабильные результаты подсчета с низкими ошибками X2 (среднее значение X2 ¼ 0,97). Наибольшую корреляцию он имел с биогенными компонентами, коэффициент корреляции Пирсона составил 0,72 для общего органического углерода (TOC) и 0,69 для общего азота (TN). Следовательно, титан можно использовать для нормализации других элементов и в некоторой степени противодействовать эффекту разбавления, вызванному высоким содержанием органического материала (Lowemark et al., 2011; Shala et al., 2014). Перед анализом были исключены экстремальные выбросы, например, по краям керна или вокруг включений и на смещении 109 см. Для обеспечения численной корреляции с другими седиментологическими прокси-данными были рассчитаны скользящие средние значения для окна размером 2 см данных сканирования.

Гравиметрическое содержание воды (WT) измерялось для 66 образцов осадочного керна, чтобы сделать вывод об уплотнении осадка, рассчитанном как разница между влажным и сухим весом материала. Анализатор углерода и азота/серы Vario EL III использовался для измерения общего содержания углерода и общего органического углерода; а анализатор Vario MAXC использовался для измерений общего органического углерода. Общий неорганический углерод (TIC) рассчитывался как разница между общим углеродом и общим органическим углеродом. Элементарное соотношение весовых процентов общего органического углерода и общего органического углерода рассчитывалось для проверки возможных изменений в осадочном происхождении органического вещества (Meyers and Lallier-Verges, 1999), далее именуемое соотношением C/N.

Были измерены размеры частиц осадка 65 образцов. Минимальный осадок весом 2,5 г сначала обрабатывался 35% перекисью водорода в течение четырех недель для удаления органических компонентов. Во-вторых, для удаления карбоната кальция из оставшегося образца использовалась 10% уксусная кислота. Наконец, объемный процент 86 классов размеров частиц диаметром от 0,3 до 1000 мкм был измерен с помощью лазерного дифракционного анализатора частиц COULTER LS 200. Сообщенные объемные проценты были рассчитаны из классов диаметра частиц: 0,0625e1 мкм, 2e62,5 мкм и 0,3e2 мкм.

#### 3.5 Анализ данных

Расчет процентного содержания пыльцы был основан на общем количестве наземной пыльцы, а концентрации пыльцы были рассчитаны с использованием

Споры-маркеры *Lycododium* (Stockmarr, 1971). Ординационный анализ данных по пыльце основывался только на тех 31 таксоне, которые встречались по крайней мере в трех образцах керн. Стратиграфически ограниченный кластерный анализ (CONISS) основывался на матрице различий Брей-Кертиса (Grimm, 1987), а для оценки значимости полученных кластеров использовалась модель сломанной палочки (Bennett, 1996).

Анализ главных компонент (PCA) был основан на данных пыльцы, преобразованных с помощью квадратного корня. Для реконструкции прошлых климатических изменений ранее установленная функция переноса пыльца-климат для средней температуры июля (TJuly), основанная на спектрах пыльцы исключительно из поверхностных отложений озер северной Сибири (Klemm et al., 2013), была применена к спектрам ископаемой пыльцы из CH-12. Пятнадцать современных образцов поверхности из экспедиции Хатанга 2011 года были добавлены в соответствии с тем же протоколом, так что набор калибровки состоял из 111 современных спектров в общей сложности. Включенные современные данные TJuly находятся в диапазоне от 7,5 до 18,5 °C, эти данные были получены из спутниковых снимков MODIS за период с 2007 по 2010 год (Duguay et al., 2012). Включение этих поверхностных образцов в современный набор данных по пыльце немного улучшило производительность средневзвешенной модели частичных наименьших квадратов, для которой использовался один компонент (WA), что привело к среднеквадратической ошибке прогноза 1,66 °C и максимальному смещению 4,1 °C для июля.

Значимость окончательно реконструированного TJuly была проверена с помощью возможных реконструкций, полученных из случайных данных об окружающей среде (с использованием 1000 реконструкций; Telford и Birks, 2011). Полные современные и ископаемые наборы данных доступны по адресу: <http://dx.doi.org/10.1594/PANGAEA.848292>.

Данные о размере зерна были проанализированы с помощью алгоритма моделирования конечных членов с использованием W-преобразования, описанного в работе Дитце и др. (2012, доступно через R-пакет EMMAGeo).

При таком подходе можно определить вклад надежных конечных членов (EM) во все различные классы размеров, а также количественный вклад EM по всему керну осадка (Weltje, 1997; Weltje and Prins, 2007). Выбор минимального потенциального числа конечных членов основывался на минимальной кумулятивной объясненной дисперсии не менее 0,9% от общей дисперсии набора данных. Значение среднего коэффициента детерминации ( $r^2$ ) использовалось для определения максимального числа EM. Была проверена надежность EM, и были рассчитаны окончательный надежный EM и остаточный член. Кроме того, элементарные отношения и данные о размере зерна были совместно проанализированы для получения закономерностей в сигнале осадка озерного архива с помощью кластерного и ординационного анализов. Ограниченный кластерный анализ и окончательная ординация следовали тому же подходу, который был описан для анализа данных пыльцы, но использовали евклидову матрицу расстояний для стандартизации и преобразования  $\log(x+1)$  данных для каждого второго сантиметра (Legendre and Gallagher, 2001).

Чтобы проверить, следовали ли сигнал осадка и сигнал пыльцы аналогичным тенденциям по ядру, результаты ординации обоих PCA сравнивались с прокрустовым вращением и ассоциированным PROTEST с 1000 перестановками (Jackson, 1995; Wischniewski et al., 2011). Подход прокрустова суперпозиции масштабирует и вращает результаты ординации для проверки максимального соответствия

наложению результатов ординации (Гауэр, 1971; Перес-Нето и Джексон, 2001).

Все статистические анализы данных выполнялись в среде R версии 3.02 (R Core Team, 2013) с использованием пакетов analog (Simpson и Oksanen, 2014), rioja (Juggins, 2014), palaeoSig (Telford, 2015) и vegan (Oksanen et al., 2015).

## 4. Результаты

### 4.1. Модель возраст-глубина

Керн озерных отложений длиной 131,5 см охватывает период с

7100 кал. лет BP до настоящего времени (рис. 2 и таблица 1). Результаты  $^{210}\text{Pb}$ / $^{137}\text{Cs}$  указывают на относительно стабильную недавнюю скорость седиментации около 0,03 см/год (таблица 2). Модель возраста-глубины, основанная на радиоуглеродных датировках, показывает схожую и стабильную скорость накопления почти по всему керну около 0,025 см/год. Однако между глубинами 87 и 61 см, что соответствует времени между 5400 и 2600 кал. лет BP, предполагается более низкая скорость накопления ~0,01 см/год. Сравнение радиоуглеродных датировок, основанных на образцах наземной древесины и мха, с близлежащими валовыми образцами не выявляет никакого смещения. Однако дата основного осадка верхней части осадка, на уровне 5,5 см, датируется примерно 1280 14C-летиями, тогда как радиометрические даты свинца и цезия для самых верхних образцов показывают, что эти отложения явно имеют более позднее происхождение, учитывая, что время испытаний ядерного оружия в 1950-х и начале 1960-х годов зафиксировано в верхних трех сантиметрах керн, «истинный» радиоуглеродный возраст этих образцов, скорее всего, зависит от ядерной деятельности (Manning et al., 1990). В окончательной модели возраст-глубина радиоуглеродный результат этого верхнего образца не учитывается.

### 4.2 Данные по пыльце

Во всех спектрах пыльцы доминирует пыльца кустарников типа BETULA NANA и типа ALNUS VIRIDIS, а вклады POACEAE и CYPERACEAE также высоки во всех основных спектрах (рис. 3). LARIX присутствует только в низких процентах, в диапазоне от 0,3 до 9,9%, показывая тенденцию к снижению на протяжении всей записи.

Анализ кластеров с ограничением по глубине выявил две значимые пыльцевые зоны, которые были далее подразделены. Нижняя зона (PZ I: 131e53 см, 7.1e2200 кал. лет BP) характеризуется высоким содержанием LARIX, типа B. NANA и типа A. VIRIDIS, тогда как верхняя зона (PZ II 52e0 см, последние 2200 лет) богата POACEAE и CYPERACEAE.

Первая ось PCA (см. рис. 1A) объясняет 70% общей дисперсии; высокие баллы по первой оси коррелируют с высокими показателями LARIX и A. Проценты типа VIRIDIS, тогда как отрицательные оценки коррелируют с процентами POACEAE, CYPERACEAE и PINUS. Вторая ось объясняет только 7% дисперсии в наборе данных и положительно коррелирует с типом B. NANA и отрицательно с ERICACEAE

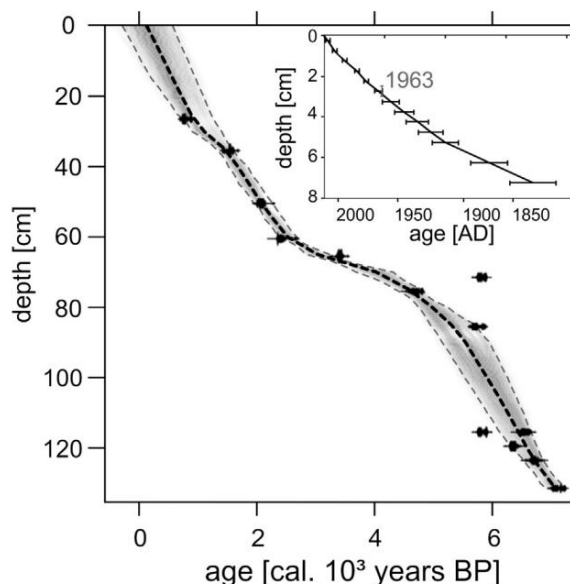


Рис. 2. Соотношение возраст-глубина (пунктирная черная линия: среднее значение, серая заштрихованная область: ошибки 2 сигма) керн осадка длиной 131,5 см из озера CH-12. На врезке показаны результаты соотношений возраст-глубина для верхних 7,5 см параллельного короткого керн на основе датировок  $^{210}\text{Pb}$ , которые были подтверждены дополнительными измерениями  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$  (Appleby et al., 1991).



Таблица 1  
Подробная информация о 15 образцах керн осадка из озера CH-12, датированных радиоуглеродным методом.

Средний образец глубина [см]	Датированный материал	Вес материал [г]	14C возраст BP [±сд]
5,5	осадок	0,31	1280 ± 40
26,5	мох	0,04	870 ± 40
35,5	моховой	0,02	1645 ± 35
50,5	осадок	0,22	2105 ± 30
60,5	мох	0,003	2375 ± 35
65,5	осадок	0,76	3190 ± 35
71,5	осадок	1,21	5075 ± 35
75,5	осадок	0,25	4160 ± 35
85,5	осадок	0,36	5000 ± 50
101,5	наземный лист и остатки стебля	0,01	7630 ± 40
115,5		0,01	5750 ± 40
116,5		0,03	5150 ± 50
119,5		0,01	5770 ± 50
123,5	древесина древесины древесный осадок	0,83	5890 ± 50
131,5	мох	0,05	6220 ± 40

Таблица 2  
Возраст самых верхних образцов из короткого керн озерных отложений на основе  
Даты 210Pb/137Cs .

Средняя глубина образца [см]	Датированный материал	Возраст [лет ±sd]
0,25	отложения	3 ± 2
1,25	отложения	17 ± 2
2,25	отложения	35 ± 2
3,25	отложения	55 ± 7
4,25	отложения	77 ± 9
7,25	отложения	172 ± 19

и некоторые таксоны трав, такие как CHENOPODIACEAE и КАПУСТНЫЕ.

Оценка температуры июля на основе передаточной функции  
Верхний образец дает 14,5 С, что хорошо согласуется с  
современный вывод о температуре на основе спутниковых данных составляет 14,2 °С для  
Хатангский район (среднее по n = 15). Тест значимости  
передаточная функция показала, что TJuly, выведенный из пыльцы  
Реконструкция была статистически значимой (p ¼ 0,037). Реконструкция  
климата на основе пыльцы июля выявила тенденцию к похолоданию  
последние ~7100 кал. лет с абсолютным изменением около 2 °С.  
Относительно общей тенденции похолодания голоцена, периоды переменных  
летняя температура наблюдалась между 1500 и 1000 кал. лет до н.э.  
(4 образца), а также между 900 и 700 кал. лет назад (3  
образцы).

4.3.Седиментологические данные

Общий органический углерод (ТОС) варьировался от 0,9 до 17,8% по весу и  
Общий азот (ТN) варьировался от 0,1 до 1,5% по весу (рис. 4). Оба  
кривые элементов показывают в целом схожие изменения, но C/N все еще варьируется  
от 1 до 16. Содержание брома хорошо коррелировало с органическим  
компоненты (индекс корреляции Пирсона: 0,6e0,65). В целом  
Содержание воды в ядре варьировалось от 15 до 85% по весу.  
нижние десять сантиметров, высокие значения измеряются с последующим  
падение около 120 см глубины, а затем постепенное увеличение  
содержание воды в поверхностных отложениях. Геохимические  
компоненты, выраженные как отношения Al/Ti, Si/Ti, Rb/Sr и Fe/Mn.  
показывают относительно небольшие изменения по всему ядру, с  
самая высокая изменчивость в нижних 45 см (7100-5500 кал. лет до н.э.,  
рис. 4). Железо и марганец показывают схожие тенденции по всему  
ядро, однако Fe показывает больше вариаций, особенно с 2700 кал

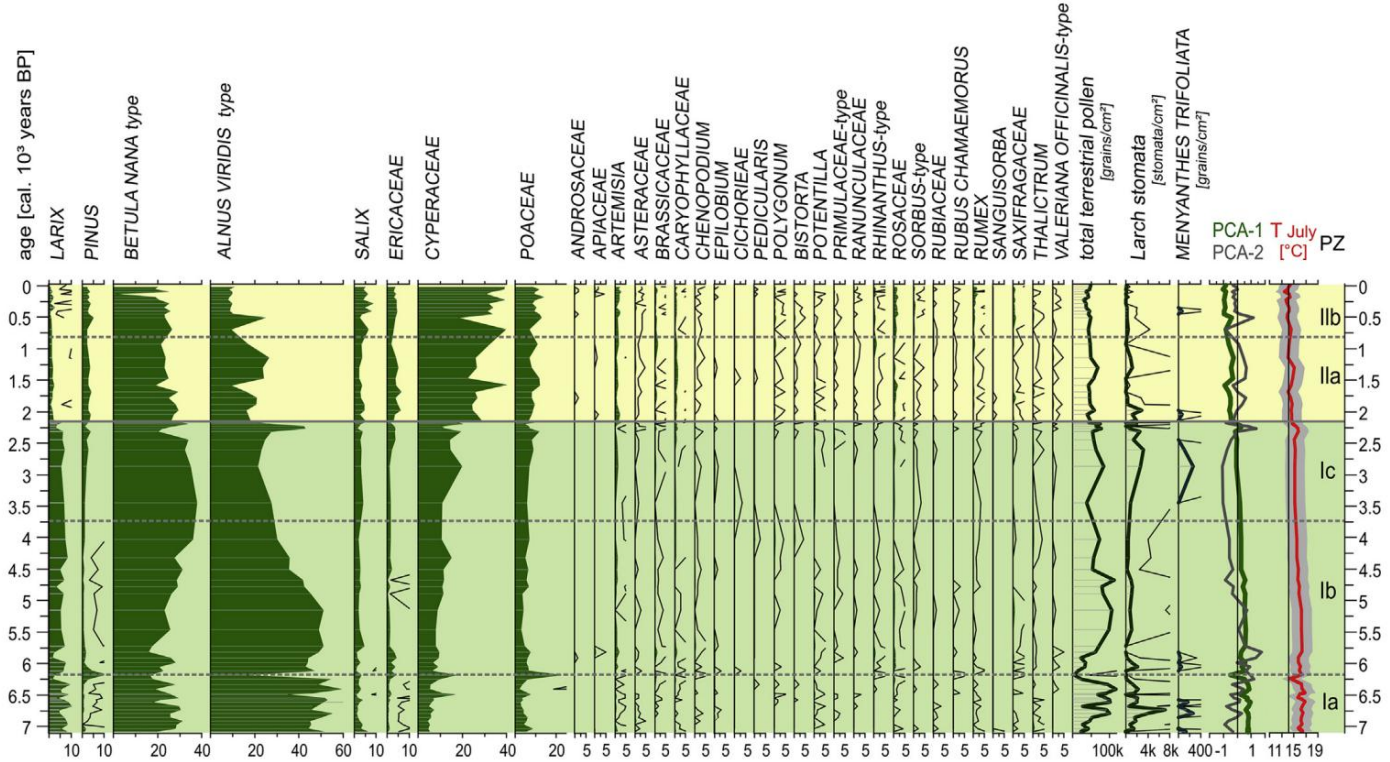


Рис. 3. Диаграмма пыльцы из озера CH-12. Приведены проценты пыльцы тех таксонов, которые были включены в статистический анализ. Расчет концентрации был основан на спорах Lycopodium подсчет маркеров (партия № 3862). Низкие проценты обозначены линией преувеличения x10, а также показаны предполагаемые пыльцевые зоны (PZ) на основе анализа CONISS. Первые два основных  
Также даны оценки компонентной оси. Реконструкция средней температуры июля (TJuly, со стандартной ошибкой) была основана на расширенной передаточной функции WA, обсуждаемой в работе Клемма  
и др. (2013).

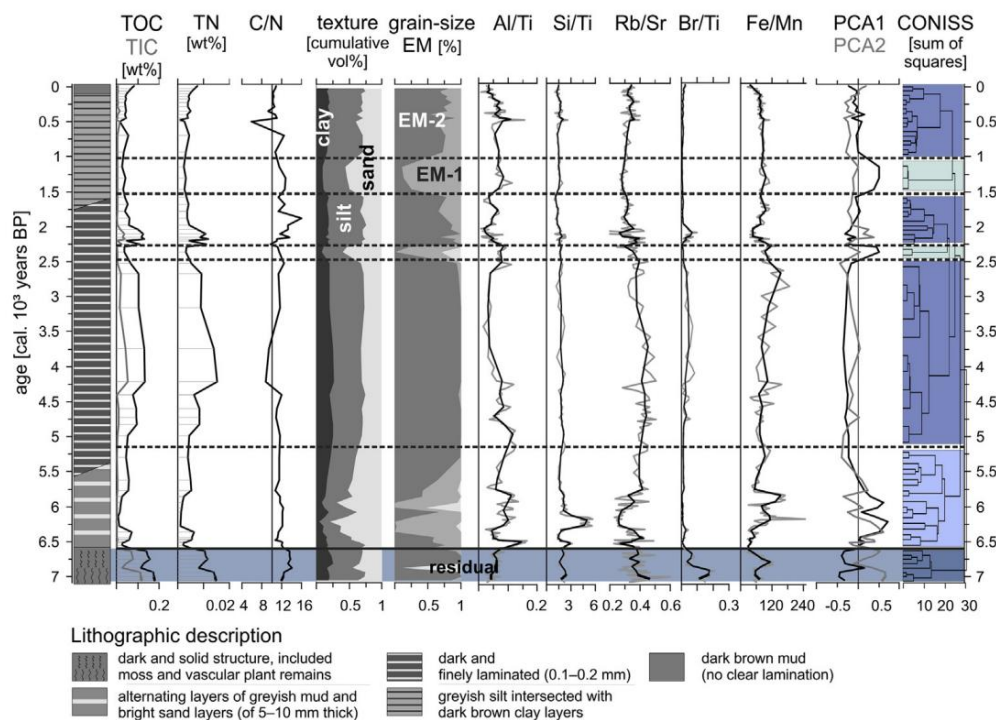


Рис. 4. Седиментологические результаты ядра осадка из озера CH-12 с общим органическим (TOC) и неорганическим углеродом (TIC), общим азотом (TN), отношениями C/N, содержанием песка, ила и глины, конечными членами на основе размера зерна (EM) и выбранными отношениями элементов, полученными из измерений XRF. Показаны баллы осей PCA, выполненного с использованием седиментологического набора данных. Показаны результаты кластеризации CONISS с основным разделением при 6600 кал. лет BP посредством цветной штриховки.

лет до нашей эры.

Минерогенный компонент осадков в основном состоит из мелкого и среднего ила с редкими участками мелкого песка со средним размером зерна ~11 мм и максимальным средним размером образца 75 мм. Выбранная модель EM объясняет среднее значение 79% от общей дисперсии по ядру осадка. Ошибка модели является наибольшей в самой нижней части ядра. EM1 имеет свой главный максимум во фракции среднего и мелкого песка. EM2 показывает свой максимум на переходе ила в глину (см. рис. 2A).

Кластерный анализ с ограничением по глубине различных седиментологических наборов данных выявляет значительный раскол на глубине 115 см (~6600 кал. лет BP). На основе кластеризации и визуального осмотра верхняя зона была далее разделена на шесть подзон (рис. 4). Первая и вторая оси PCA объясняют 50% и 15% дисперсии соответственно (см. рис. 3A). Первая ось положительно коррелировала со значениями EM1 и Rb/Sr и отрицательно коррелировала со значениями EM2 и Al/Ti. Вторая ось разделила TOC и C/N, которые охватывали положительную сторону, от Fe/Mn на отрицательной стороне.

#### 4.4 Численное сравнение пыльцевых и седиментологических данных

В целом, седиментологические параметры показывают более высокую изменчивость, чем данные по пыльце, однако общие тенденции двух наборов данных значительно коррелируют, как показало вращение Прокруста ( $r = 0.49$ ,  $p < 0.001$ ). Качество соответствия между ординатами показано на рис. 5, где периоды более высокого согласия имеют более низкие остатки. Эта проверка подтверждает впечатление от двух кластерных анализов о том, что соответствующие кластеры каждого набора данных не полностью перекрываются. Во-первых, основное разделение набора данных осадка, которое отделяет нижнюю часть от оставшегося ядра (последние 6500 лет), вообще не указано в зональности пыльцы, хотя самая нижняя часть зоны (PZ Ia) отличается высокой изменчивостью всех таксонов пыльцы и высокими концентрациями устьиц и *Menyanthes trifoliata*. Во-вторых, периоды крупных изменений в

седиментологические данные за последние 6500 кал. лет BP всегда немного предшествуют периодам крупных изменений в палинологических данных (рис. 5). Например, крупные изменения в седиментологических данных между 2500 и 2300 кал. лет BP находят соответствие в данных по пыльце около 2200 кал. лет BP. Аналогично, сдвиг седиментологического режима, зафиксированный для периода между 1500 и 1000 кал. лет BP, может соответствовать резкому изменению в данных по пыльце около 700 кал. лет BP.

#### 5. Обсуждение

##### 5.1 Оценка исследуемых параметров как показателей региональной растительности и климата, а также развития водосбора озера.

При выборе места исследования мы стремились захватить сигнал пыльцы регионального масштаба. Поскольку в CH-12 отсутствуют какие-либо впадающие потоки, доля поступления речной пыльцы должна быть минимальной; также только незначительная часть пыльцы может быть внесена в небольшое озеро через склоновый поток (Crowder and Cuddy, 1973; Fall, 1992). Следовательно, большая часть отложенных пыльцевых зерен имеет воздушное происхождение. В зависимости от размера озера ожидается, что соответствующая область источника пыльцы (RSAP; Sugita, 1994) будет охватывать область радиусом от сотен метров до нескольких километров. Оценка ее фактического размера зависит не только от размера озера, но и от окружающей растительности, а именно ее состава, пространственной структуры и открытости (Sugita et al., 1999; Bunting et al., 2004; Poska et al., 2011). Сегодня озеро окружено тундрой с высокой долей арктических трав, характеризующихся низкой продуктивностью пыльцы. Фоновая пыльцевая нагрузка высока, а пространственный масштаб растительности, отраженный в источнике пыльцы, довольно велик (Pitkanen et al., 2002; Broström et al., 2005; von Stedingk et al., 2008). RSAP, возможно, имеет радиус около десяти-двадцати километров, как предполагает высокое значение 25 км для современной растительности в районе реки Хатанга (Niemeyer et al., 2015). RSAP, вероятно, был намного меньше в

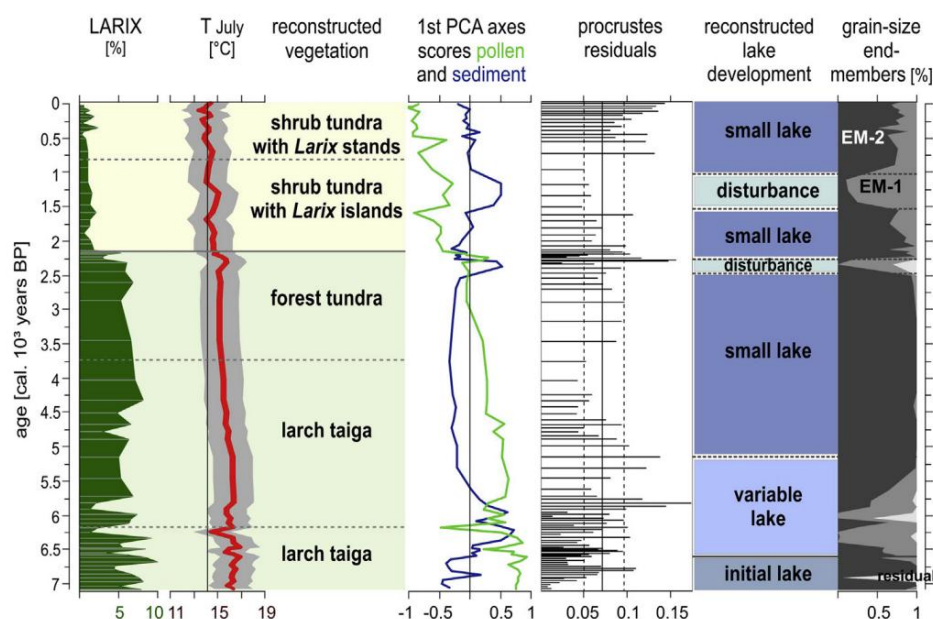


Рис. 5. Сравнение сигналов пыльцы и осадка из озера СН-12. Зональность каждого набора данных показана. С правой стороны указаны проценты LARIX, а также Реконструкция средней температуры июля на основе пыльцы. Средние панели показывают оценки первой оси анализа главных компонент (PCA) для данных пыльцы и осадков, и Остатки прокрустового вращения, в которых указана степень различия между двумя PCA, где сплошная линия показывает медиану, а пунктирные линии - верхнюю и нижнюю нижние квантили остатков (результаты Прокруста: сумма квадратов Прокруста  $\frac{1}{4}$  0,76, RMSE  $\frac{1}{4}$  0,11, PROTEST  $r^2$   $\frac{1}{4}$  0,49, p-значение  $\frac{1}{4}$  0,001). Справа показан размер зерна на основе Результаты моделирования конечных элементов данных об осадках.

времена более густых лесов в середине голоцена по сравнению с сегодня. Это теоретическое соображение подтверждается наблюдением, что значения PINUS изменяются в противоположность LARIX. Мы рассматриваем сосну пыльца как индикатор открытости ландшафта, потому что нет современных или Ископаемое присутствие сосен в региональной растительности задокументировано. Сообщается о современных и ископаемых находках Pinus по крайней мере в 200 км к востоку и югу от места исследования (Хультен и Фрайс, 1986; Кременецкий и др., 2000). Зерна PINUS хорошо известны своей способностью переноситься на большие расстояния, особенно в открытых ландшафтах (Birks и Birks, 2003; Hicks, 2006; Ertl et al., 2012). Осознание таких изменений в открытости ландшафта и RSAP является необходимо при сравнении сигналов пыльцы с другими переменными окружающей среды.

Хорошо известно, что LARIX недостаточно представлен в пыльце. спектры по сравнению с его распространенностью в растительности, потому что это средне-низкая производительность пыльцы и низкая дисперсия пыльцы (Клейден и др., 1996; Бинни и др., 2011; Клемм и др., 2013). Будучи листопадное дерево, его листопродукция высокая и, следовательно, интерпретация данных пыльцы в отношении изменений в границах леса может быть улучшено за счет концентрации устьиц Larix в осадке, где иглы лиственницы входят в состав органического компонента (Амманн и др., 2014; Биркс, 2014). Тем не менее, оценка лиственничного покрова остается проблема, и процент LARIX около 0,5% может указывать на его локальное присутствие в растительности (Лисицына и др., 2011). Современные исследования отложений в северной Сибири показывают, что Северные лиственничные леса обычно отражают не менее 2% LARIX в спектры пыльцы (Клемм и др., 2013).

Количественная реконструкция средней температуры июля на основе пыльцы тесно связана с PCA1 и реконструированным Изменения больше, чем диапазоны ошибок. Значимость Реконструкция TJuly для этого ядра также подтверждает, что TJuly может быть Движущая сила изменений пыльцы. Поэтому тренд и абсолютная температура смещаются между средним и поздним голоценом можно считать надежными. Абсолютные значения, однако, могут быть скорее смещены в сторону среднего значения набора тренировок (см., например, «эффект края», обсуждаемый Бирксом и др., 2012). Абсолютные значения

немного выше, чем измерения климатической станции Хатанга 12,5 C, поскольку передаточная функция построена на основе данных спутника MODIS изображения, полученные в относительно теплые летние месяцы 2007 года и 2010 (Клемм и др., 2013).

Водосбор озера СН-12 не имеет речных притоков и хорошо ограничен в пределах нескольких сотен метров от края озера; следовательно, масштаб, зафиксированный седиментологическими прокси, относительно локальный. C/N указывает на относительный вклад водных и наземного органического вещества в озерный осадок. Полученный Соотношения C/N в основном находятся в диапазоне от 10 до 15, что предполагает смесь оба источника (Meyers и Teranes, 2001). Мы предполагаем, что высокое C/N значения, например, в нижней части керна, относятся к низкому уровню воды уровни, которые приводят к тому, что большие количества земного материала достигают Положение керна в центре озера. На основе соотношения C/N мы предположим, что относительное содержание ООУ в этом озере также отражает относительные изменения в поставках органических и минеральных материалов, но также зависит от продуктивности внутри озера (Бринер и др., 2006). Предполагается, что соотношение Fe/Mn отражает уровень воды в озере. смешивание на границе раздела вода-осадок (например, Simola, 1983; Och и др., 2012; Naeher и др., 2013). Обычно предполагается, что железо и марганец ведут себя одинаково в озерно-водных средах, с исключением, что оксиды марганца растворяются и выпадают в осадок при более высокий окислительно-восстановительный потенциал, чем у железа. Таким образом, вариации отношения Fe/Mn указывают на изменения в насыщении кислородом дна воды (Haberzettl et al., 2007). Такие изменения связаны с смешивание воды озера, и, следовательно, дать указание, для например, глубина воды или изменения скорости ветра (Мюллюмаа и Муртониemi, 1986). В этом небольшом озерном бассейне соотношение Fe/Mn составляет предполагается, что отражает смешивание воды озера, т.е. подачу кислорода на границу раздела вода-осадок. Меньше смешивания произошло во время времена более стабильных условий в озере с относительно высоким уровнем воды уровни.

Согласно нашим полевым наблюдениям, отложения в пределах малые водосборы довольно однородны. Изменения в гранулометрическом составе и отдельных элементарных соотношениях минерогенного компонента, таким образом, в основном представляют собой изменения в



процессы транспортировки и седиментации в непосредственной близости от места отбора керн, а не изменения в источнике материала (Dearing and Jones, 2003). Данные о размере зерен этого керна озера указывают на возникновение двух основных режимов седиментации в течение последних 7100 лет. Эти сигналы размера зерен хорошо соответствуют изменениям в соотношениях элементов, среди которых Rb/Sr и Al/Ti. Изменения в соотношении между стронцием и рубидием связаны с изменениями в концентрации частиц ила и глины в аллохтонном осадочном материале (Koinig et al., 2003; Kalugin et al., 2007; Vasskog et al., 2012). Кроме того, это соотношение было осторожно связано с изменениями в химической прочности выветривания в водосборе (например, Goldberg et al., 2010; Zeng et al., 2013). Мы не думаем, что химическое выветривание за последние 7100 лет изменилось с такой высокой изменчивостью, как указано кривой Rb/Sr, потому что химическое выветривание, как правило, подчинено физическому выветриванию в таких высокоширотных условиях (French, 2007; Fedotov et al., 2015). Следовательно, мы считаем, что Rb/Sr указывает на прочность поступления глинистого осадка, и в этой обстановке более высокие значения могут соответствовать условиям озерного осадконакопления во времена более стабильных условий водосбора и озера. Изменения как алюминия, так и кремния, как правило, связаны с содержанием песка в озерных отложениях, обычно используемых в качестве прокси для речного поступления (Eusterhues et al., 2002; Kylander et al., 2011), например. В этой обстановке сигнал Al/Ti отражает поступление богатого алюминием грубого материала, происходящего с окружающих склонов. Более того, Si часто связывался с биологическими источниками и первичной водной продуктивностью. Постоянное присутствие диатомовых водорослей зафиксировано по всему этому керну (личное сообщение Л.А. Пестряковой). Влияние этих результатов на осажженный внутри озера Si трудно определить, но низкая изменчивость Si/Ti может указывать на непрерывное биогенное поглощение в водной толще, что привело к довольно постоянному осаждению Si и, возможно, наложению его литогенных вариаций поступления.

Можно предположить, что участки глинисто-илистых осадков и более высокие значения Rb/Sr представляют периоды глубоких озерных условий, поскольку большое расстояние между местом отбора проб и берегом озера приводит к осаждению довольно мелкой фракции. Напротив, участки с более высокой изменчивостью размера зерна и отношениями Al/Ti представляют нестабильные озерные условия и приток менее отсортированных осадков с близлежащих берегов озера.

## 5.2. Изменение растительности и климата в Арктической Сибири за последние ~7000 лет

Наше палинологическое исследование выявило общее сокращение лиственничных лесов за последние ~7100 лет. Растительность среднего голоцена характеризовалась открытой тайгой Larix с кустарниками Alnus в подлеске. Современные условия растительности, т. е. кустарниковая тундра, в которой доминируют осоки и злаки с редкими насаждениями Larix, установились примерно 2200 cal лет BP. Эта наблюдаемая общая тенденция растительности голоцена подтверждает более ранние исследования на северо-востоке Сибири с использованием анализов пыльцы и/или макроокаменелостей (например, Prentice and Webb, 1998; Hahne и Melles, 1997; Tarasov и др., 1998, 2007; MacDonald и др., 2000a, 2008; Andreev и др., 2011 и ссылки в них) или подходов моделирования (Monserud и др., 1998; Kleinen и др., 2011). Наши данные показывают, что сильный оборот произошел между 3000 и 2000 лет назад; Аналогичные сроки сильных изменений были зарегистрированы и в других местах Таймырского региона (Андреев и др., 2011) и/или в большинстве циркумарктических сред (Кауфман и др., 2004; Салонен и др., 2011; Луото и др., 2014).

Реконструкция климата на основе данных пыльцы, полученная в ходе нашего исследования, показывает, что за последние 7100 лет летняя температура изменилась примерно на 2 °C. Эта величина изменения температуры в голоцене в целом согласуется с другими исследованиями, проведенными в районе Таймыра и

по всей северной Сибири (Miller et al., 2010; Andreev et al., 2011) и объясняется уменьшением солнечной радиации летом в высоких северных широтах (Berger and Loutre, 1991) и связанными с этим механизмами обратной связи в высоких широтах (Kerwin et al., 1999; Wanner et al., 2008; Marcott et al., 2013). Некоторые отчетливые короткомасштабные изменения очевидны в течение последних 2000 лет реконструкции (рис. 6). Теплая фаза около 1500–1000 кал. лет назад может отражать средневековую климатическую аномалию (МСА, определена по Mann et al., 2009 между 1050 и 750 годами назад в северной Европе). Возможный МСА также указывается хронологиями колец деревьев из близлежащего региона Хатанги (Briffa et al., 2008; McKay and Kaufman, 2014). Также региональные реконструкции летних температур озер, основанные на пыльце и диатомовых водорослях, указывают на теплый МСА (например, озеро Лама: Andreev et al., 2004; Kumke et al., 2004). За этим теплым интервалом последовал быстрый период похолодания в Северном полушарии, известный как Малый ледниковый период (Briffa and Osborn, 1999; Briffa, 2000; MacDonald et al., 2008). В озере CH-12 похолодание отмечено около 900 кал. лет назад, как и в районе озера Лабаз, удаленного на 100 км (Andreev et al., 2002).

## 5.3. Водосбор и развитие озера

Первоначальное развитие озера началось с небольшого водоема в болотистой среде. Высокий уровень наземной органики вместе с наличием крупных макроископаемых подтверждает вывод об очень локальном осаждении растительного материала в небольшую влажную впадину. Кроме того, присутствие пыльцы полуводной M. trifoliata типично для мелководной среды.

Первоначальное озерное осадконакопление началось около 7000 кал. лет назад во время поздней фазы регионального климатического оптимума, который имел место с 9000 по 6800 кал. лет назад (Андреев и др., 2011). Предполагается, что термокарстовые процессы более активны в периоды потепления, и, соответственно, сильная термокарстовая активность была зарегистрирована в Сибири в раннем и среднем голоцене (Романовский и др., 2004; Гроссе и др., 2006). В то время высокие температуры и высокая влажность в сочетании с плохим дренажем могли способствовать образованию небольшой заполненной водой впадины на исследуемом участке, которая просуществовала около 500 лет.

Последующее оседание первоначальной депрессии могло быть быстрым из-за внутренних механизмов обратной связи (Czudek and Demek, 1970; Murton, 2001). В современной Якутии сообщаются о быстрых скоростях оседания 5–10 см/год (Brouchkov et al., 2004) и 17–24 см/год (Fedorov and Konstantinov, 2003). Наши седиментологические данные за период, следующий за образованием первоначального озера, показывают высокую изменчивость от 6500 до примерно 5200 кал. лет BP, что указывает на процессы углубления водоема и формирования рельефа. Оползни от таяния и нестабильные окраины озера могли привести к тому, что смесь тонкого и грубого материала накапливалась в мелком, хорошо проветриваемом озере. Это первоначальное формирование озера также может быть поддержано пейнологическими данными, где в самой нижней секции, Ia, высокая изменчивость, особенно в таксонах пыльцы трав, и высокая концентрация устьиц лиственницы указывают на относительно меньшую среду седиментации. Наша реконструкция предполагает, что седиментация озера стабилизировалась, вероятно, из-за образования более глубокого озера примерно после 5200 кал. лет BP. За последние 5200 лет озеро испытало два краткосрочных изменения в седиментологическом режиме, примерно 2500 кал. лет BP и около 1500 кал. лет BP, когда произошел сильный приток несортированного материала в бассейн озера. Такие притоки могут указывать либо на изменение гидрологического режима водосбора озера, что привело к увеличению притока воды с окружающих склонов, либо представлять собой приток из-за оползней с нестабильных окраин. Термокарстовые процессы связаны с гидроклиматическими изменениями и обычно включают кратковременные процессы, проявление которых специфично для конкретного участка (Калугин и др., 2007; Бискаборн и др., 2013).



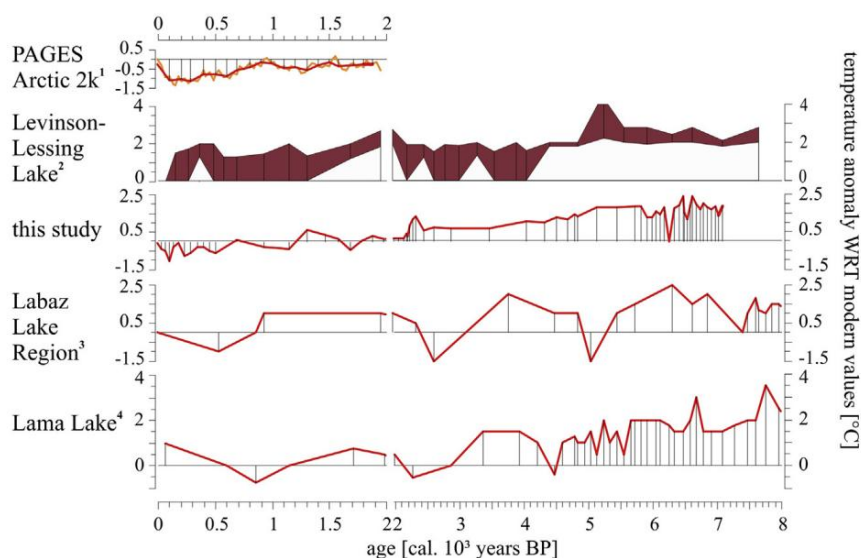


Рис. 6. Реконструированные температурные аномалии за последние 8000 лет по всей Арктике. Чтобы включить хорошее разрешение за последние 2000 лет, PAGES Arctic 2k был включен в верхнюю часть, которая показывает годовую изменчивость температуры по всей Арктике на основе расширенной и пересмотренной базы данных (версия 1.1). Здесь красная линия представляет столетие, а оранжевая линия - 30-летнее разрешение годовой температурной аномалии относительно (WRT) среднегодового значения с 1961 по 1990 год (1 McKay and Kaufman, 2014). Три доступных записи, расположенные с севера на юг, средней температуры июля из региона Таймыра (рис. 1) основаны на пыльце, их калиброванный возраст основан на опубликованных моделях возраст-глубина и радиоуглеродных датировках для кернов (с использованием программного пакета Bacon; Blaauw and Christen, 2011). Наибольшая неопределенность для этих возрастных моделей обнаружена в пределах последних 3000 лет из-за отсутствия радиоуглеродных дат. Приведена аномалия температуры июля относительно современных значений. Для озера Левинсон-Лессинг минимальные и (Реконструкции воспроизведены в соответствии с <sup>2</sup>максимальные значения Андреев и др. (2003). (3 Андреев и др., 2002; 4. Андреев и др., 2004). (Для интерпретации ссылок на цвет на этом рисунке легендой, читатель отсылается к веб-версии этой статьи.)

#### 5.4 Оценка реконструкции

Общее сходство в косвенных показателях для локальных изменений озер и водосборов и региональных изменений растительности, вероятно, происходит из-за совместного драйвера, которым, скорее всего, является изменение климата. Более ранние исследования показали, что по сравнению с изменениями растительности изменения в озерной седиментации или эрозии водосбора фиксируются в отложениях в основном с короткими временными задержками (Dearing and Blaauw, 2008). Другие возможные факторы, которые могут привести к аналогичным изменениям в прокси, — это нарушения, вызванные, например, пожаром, насекомыми или людьми. В этой нетронутой обстановке человеческое нарушение можно считать минимальным, как и серьезные эффекты от насекомых (Hauck et al., 2008; Dulamsuren et al., 2010). Однако пожар является частым явлением в экотоне лесотундры (Berner et al., 2012) и мог в некоторой степени повлиять на исследуемый участок. Однако анализ древесного угля не был включен в этот подход.

Это сравнение развития окружающей среды в двух пространственных масштабах показало, что локальные изменения в озере и его водосборе, возможно, предшествовали региональным изменениям растительности на несколько десятилетий. Однако более подробные выводы о задержках вегетации невозможны из-за ограниченного временного разрешения результатов реконструкции. Соответственно, только общие тенденции реконструированного климата на основе пыльцы, т. е. вариации в тысячелетних временных масштабах, являются надежными, в то время как краткосрочные изменения могут быть смещены запаздывающими реакциями. Тем не менее, мы предполагаем, что пыльца является наиболее надежным прокси для реконструкции климата, поскольку все лимнологические прокси потенциально нелинейно реагируют на изменение климата.

#### 6. Выводы

Общее похолодание летней температуры примерно на 2 °C с 7000 кал. лет до н. э. было реконструировано путем применения функции переноса на основе пыльцы к записи осадочных пород из озера, расположенного на современной северной границе лиственницы на юге полуострова Таймыр. Эта тенденция является значимой и добавляет информацию

относительно региона Таймыра и особенно хорош из-за относительно хорошего разрешения озерного ядра, охватывающего последние 2000 лет. Снижение температуры в основном отражает уменьшение плотности лиственничных лесов, подтверждая высокую чувствительность этой экосистемы к изменениям климата. Региональное изменение растительности в целом соответствует развитию озерной системы, которое, вероятно, обусловлено термокарстовыми процессами, связанными с климатом. Однако изменения и изменчивость в прокси-данных, т. е. мы сделали вывод о запаздывающей реакции растительности и нелинейной реакции озерной системы на климат. Подход этого исследования, заключающийся в объединении регионального сигнала растительности с более локальным сигналом водосбора озера, помогает нам понять разрешение обоих реконструированных сигналов и подчеркивает, что необходимо тщательно рассмотреть масштаб реконструкции.

#### Благодарности

Мы благодарим Марейке Вечорек, Роми Зибульски, Руслана Городничева, Алексея Колмогорова и Алексея Пестрякова за помощь в полевых и лабораторных работах. Мы также благодарны за полезные комментарии двух анонимных рецензентов по более ранней версии рукописи.

#### Приложение А. Дополнительные данные

Дополнительные данные по этой статье можно найти по адресу <http://dx.doi.org/10.1016/j.molstruc.2015.07.074>.

#### Ссылки

Абаимов А.П., 2010. Географическое распространение и генетика видов лиственницы сибирской. В: Осава А., Зырянова О.А., Мацура Ю., Кайморо Т., Вейн Р.В. (ред.). Экосистемы вечной мерзлоты: сибирские лиственничные леса. Спрингер, Нидерланды, стр. 41e58.

Амманн, Б., ван дер Кнаап, В.О., Ланг, Г., Гайяр, М.-Й., Кальтенридер, П., Рош, М., Финзингер, В., Райт, Х.Э., Тиннер, В., 2014. Потенциал анализа устьиц хвойных для оценки наличия хвойных деревьев: примеры из Альп. Veg. Hist. Archaeobot. 23, 249e264. <http://dx.doi.org/10.1007/s00334->

014-0431-9.

Ананьева (Малкова), Г.В., Пономарева, О.Е., 2001. Процент покрытия озер в Российской Арктике. В: Рейнольдс, М.К., Маркон, К.Дж. (ред.), Четвертый международный семинар по картированию циркумполярной арктической растительности: сборник кратких докладов, рефератов и комментариев, представленных в Российской академии наук , стр. 43–45. Москва, Россия.

Андреев А.А., Зигерт К., Климанов В.А., Деревягин А.Ю., Шилова Г.Н., Мелес М., 2002. Позднеплейстоценовые и голоценовые изменения растительности и климата Таймырской низменности Северной Сибири, восстановленные по пыльцевым записям. Кват. Рез. 57 (1), 138e150. <http://dx.doi.org/10.1006/qres.2001.2302>.

Андреев А.А., Тарасов П.Е., Зигерт К., Эбель Т., Климанов В.А., Мелес М., Бобров А.А., Деревягин А.Ю., Любинский Д.Д., Хуббертен Х.-В., 2003. Поздно Плейстоценовая и голоценовая растительность и климат на севере полуострова Таймыр, Арктическая часть России. Борей 32 (3), 484e505. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1502-3885.2003.tb01230.x>.

Андреев А.А., Тарасов П.Е., Климанов В.А., Мелес М., Лисицына О.М., Хуббертен Х.-В., 2004. Изменения растительности и климата вокруг озера Лама, полуостров Таймыр, Россия в позднем плейстоцене и голоцене. Кват. Межд. 122 (1), 69e84. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2004.01.032>.

Андреев А.А., Ширрмайстер Л., Тарасов П.Е., Ганопольский А., Бровкин В., Зигерт К., Веттерих С., Хуббертен Х.-В., 2011. История растительности и климата в Лаптевых горах. Морской регион (Арктическая Сибирь) в конце четвертичного периода по данным пыльцевых записей. Кват. наук. Откр. 30 (17), 2182e2199. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.12.026>.

Appleby, PG, 2001. Хроностратиграфические методы в современных отложениях. Анализ бассейнов, отбор кернов и хронологическая техника. В: Last, WM, Smol, JP (ред.), Отслеживание изменений окружающей среды с использованием озерных отложений, т. 1. Kluwer Academic, стр. 171e203. [http://dx.doi.org/10.1007/0-306-47669-X\\_9](http://dx.doi.org/10.1007/0-306-47669-X_9).

Эппли, П.Г., Ричардсон, Н., Нолан, П.Дж., 1991. 241Ам-датирование озерных отложений. Гидробиология 214, 35e42.

Бекряев, Р.В., Поляков, И.В., Алексеев, В.А., 2010. Роль полярного усиления в долговременных изменениях температуры приземного воздуха и современном потеплении Арктики. J. Clim. 23 (14), 3888e3906. <http://dx.doi.org/10.1175/2010JCLI3297.1>.

Беннетт, К.Д., 1996. Определение количества зон в биостратиграфической последовательности. New Phytol. 132 (1), 155e170. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.1996.tb04521.x>.

Бергер, А., Лутр, М.Ф., 1991. Значения инсоляции для климата за последние 10 миллионов лет. Quat. Sci. Rev. 10 (4), 297e317. [http://dx.doi.org/10.1016/0277-3791\(91\)90033-Q](http://dx.doi.org/10.1016/0277-3791(91)90033-Q).

Бернер, Л.Т., Бек, П.С.А., Лоранти, М.М., Александр, Х.Д., Мак, М.К., Гетц, С.Дж., 2012. Распределение биомассы лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi*), пожарный режим и восстановление после пожара на северо-востоке Сибири. Biogeosciences 9, 3943e3959. <http://dx.doi.org/10.5194/bg-9-3943-2012>.

Бернер, Л.Т., Бек, П.С.А., Банн, А.Г., Гетц, С.Дж., 2013. Реакция растений на изменение климата вдоль экотона лесотундры на северо-востоке Сибири. Glob. Chang. Биол. 19 (11), 3449e3462. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.12304>.

Beug, HJ, 2004. Leitfaden der Pollenbestimmung für Mitteleuropa und angrenzende Gebiete. Verlag Доктор Фридрих Пфайль, Мюнхен, с. 545 (на немецком языке).

Бинни, НА, Геттинг, Р.В., Нилд, JM, Сугита, S., Эдвардс, ME, 2011. Идентификация линий деревьев по данным пыльцы: за пределами предела? J. Biogeogr. 38 (9), 1792e1806. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2699.2011.02507.x>.

Биркс, Х. Дж. Б., 2014. Проблемы представления и анализа стратиграфических данных по макроископаемым растениям. Veg. Hist. Archaeobot. 23 (3), 309e330. <http://dx.doi.org/10.1007/s00334-013-0430-2>.

Birks, HH, Birks, HJB, 2003. Реконструкция климата голоцена по пыльце и макроокаменностям растений. В: Mackay, A., Battarbee, RW, Birks, HJB, Oldfield, F. (ред.), Global Change in the Holocene. Arnold, London, стр. 342–357.

Биркс, Х. Дж. Б., Лоттер, А. Ф., Джаггинс, С., Смол, Дж. П., 2012. Отслеживание изменений окружающей среды с использованием озерных отложений: обработка данных и численные методы, т. 5. Спрингер, стр. 745.

Бискаборн, Б.К., Герцихук, У., Большиянов, Д.Ю., Швабморн, Г., Дикманн, Б., 2013. Термокарстовые процессы и осадконакопление в озере в тундре, северо-восточная Сибирь. Permafrost. Periglacial. Process 24 (3), 160e174. <http://dx.doi.org/10.1002/ppp.1769>.

Блауа, М., Кристен, Дж. А., 2011. Гибкие модели палеоклимата «возраст-глубина» с использованием процесса авторегрессии гамма. Bayesian Anal. 6 (3), 457e474. <http://dx.doi.org/10.1214/ba/1339616472>.

Блэкмор, С., Штайнманн, JAJ, Хоэн, PP, Пунт, W., 2003. BETULACEAE и COR-YLACEAE. Rev. Palaeobot. Palynol. 123 (1e2), 71e98. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-6667\(02\)00156-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-6667(02)00156-2).

Блисс, Л.С., 1981. Введение. В: Блисс, Л.С. (ред.), Экосистемы тундры: сравнительный Анализ. № 25. Издательство Кембриджского университета, стр. 3e46.

Бриффа, КР, 2000. Ежегодная изменчивость климата в голоцене: интерпретация послания древних деревьев. Quat. Sci. Rev. 19 (1), 87e105. [http://dx.doi.org/10.1016/S0277-3791\(99\)00056-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0277-3791(99)00056-6).

Бриффа, К. Р., Осборн, Т. Дж., 1999. Видение леса за деревьями. Наука 284 (5416), 926e927. <http://dx.doi.org/10.1126/science.284.5416.926>.

Бриффа, К. Р., Шишов, В. В., Мелвин, Т. М., Ваганов, Е. А., Грудд, Х., Хантемиров, Р. М., Эронен, М., Наурзбаев, М. М., 2008. Тенденции последних температур и радиального роста деревьев за 2000 лет по всей северо-западной Евразии. Philos. Trans. R. Soc. B 363 (1501), 2269e2282. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2007.2199>.

Briner, JP, Michelutti, N., Francis, DR, Miller, GH, Axford, Y., Wooller, MJ, Wolfe, AP, 2006. Многофакторная озерная летопись изменения климата в голоцене на северо-востоке Баффиновой Земли, Арктическая Канада. Quat. Res. 65 (3), 431e442. <http://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2005.10.005>.

Бростром, А., Сугита, С., Гайяр, М.-Й., Пилесйо, П., 2005. Оценка пространственного масштаба распространения пыльцы в культурном ландшафте южной Швеции. Голоцен 15 (2), 252e262. <http://dx.doi.org/10.1191/0959683605h790rp>.

Брушков, А., Фукуда, М., Федоров, А., Константинов, П., Ивахана, Г., 2004. Термокарст как кратковременное нарушение вечной мерзлоты, Центральная Якутия. Периглак. Процесс 15(1), 81e87. <http://dx.doi.org/10.1002/ppp.473>.

Браун, Дж., Ферриер, О., Хегинботтом, Дж. А., Мельников, Э., 2014. Циркумарктическая карта вечной мерзлоты и состояния грунтового льда. Национальный центр данных по снегу и льду, Боулдер, Колорадо, США. <http://nsidc.org/data/ggd318>.

Бантинг, М. Дж., Гайяр, М.-Дж., Сугита, С., Миддлтон, Р., Бростром, А., 2004. Структура растительности и район источника пыльцы. Голоцен 14 (5), 651e660. <http://dx.doi.org/10.1191/0959683604h744rp>.

Чернов, Ю.И., Матвеева, Н.В., 1997. Арктические экосистемы России. В: Wielgolaski, FE (Ред.), Полярная и альпийская тундра. Elsevier, Амстердам, стр. 361–507.

Клейден, С.Л., Квинар, Л.К., Макдональд, Г.М., 1996. Содержание устьиц и пыльцы в поверхностных отложениях озера через линию леса на полуострове Таймыр, Сибирь. Can. J. Bot. 74 (7), 1009e1015. <http://dx.doi.org/10.1139/b96-125>.

Crowder, AA, Cuddy, DG, 1973. Пыльца в небольшом речном бассейне: Wilton Creek, Ontario. B. Birks, HJB, West, RG (ред.), Quaternary Plant Ecology. Blackwell Scientific Publications, Oxford, стр. 61–77.

Чудек, Т., Демек, Й., 1970. Термокарст в Сибири и его влияние на развитие opment of lowland relief. Quat. Res. 1 (1), 103e120.

Dearing, JA, Jones, RT, 2003. Связь временных и пространственных измерений глобального потока осадков с помощью записей об озерных и морских отложениях. Glob. Planet. Chang. 39 (1e2), 147e168. [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00022-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00022-5).

Детлефф, Д., Рахольд, В., Тингельот, М., Антонов, М., 2000. Перенос речных частиц морским льдом из моря Лаптевых в пролив Фрама на основе исследований глинистых минералов. Int. J. Earth Sci. 89, 496e502. <http://dx.doi.org/10.1007/s005310000109>.

Dietze, E., Hartmann, K., Diekmann, V., Jmker, J., Lehmkuhl, F., Opitz, S., Stauch, G., Wuennemann, V., Borchers, A., 2012. Алгоритм конечного члена для расшифровки современных детритных процессов из озерных отложений озера Дунги Кона, северо-восточное Тибетское плато, Китай. Осадконакопление. Геология. 243e244, 169e180. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2011.09.014>.

Duguay, CR, Soliman, A., Hachem, S., Saunders, W., 2012. Циркумполярная и региональная температура поверхности земли (LST), версия 1, со ссылками на изображения Geotiff и файлы NetCDF (2007–2010). Университет Ватерлоо, Канада. <http://dx.doi.org/10.1594/PANGAEA.775962>.

Дуламсурен, К., Хаук, М., Лейшнер, Х.Х., Лейшнер, К., 2010. Снижение роста *Larix sibirica*, вызванное непарным шелкопрядом, в лесостепном экотоне. Ден-дрохронология 29 207e213. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2009.05.007>.

Элср Дж., Гиббард П.Л., 2007. Масштабы и хронология кайнозойского глобального оледенения. Кват. Межд. 164e165, 6e20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2006.10.008>.

Элмendorф, СК, Генри, ГХР, Холлистер, РД, Бюрк, Р.Г., Бюркман, АД, Калаган, ТВ, Кольтер, Л.С., Купер, Э.Дж., Корнелиссен, ЮХК, Дэй, Т.А., Фосаа, АМ, Гулд, Вашингтон, Гретард Оттир, Дж., Харт Дж., Херманц Л., Хик Д.С., Хофгаард А., Джаррад Ф., Йонсд Оттир, И.С., Койпер, Ф., Кландеруд, К., Клайн, Дж.А., Кох, С., Кудо, Г., Ханг, С.И., Левен, В., Мэй, Дж.Л., Меркадо, Дж., Михельсен А., Молау У., Майерс-Смит И.Х., Обербауэр С.Ф., Пипер С., Пост Э., Риксен, К., Робинсон, СН, Шмидт, НМ, Шейвер, GR, Стенстром, А., Толванен, А., Тотланд, Ø., Трокслер, Т., Варен, С.-Н., Веббер, Р.У., Уэлкер, JM, Вуки, РА, 2012a. Глобальная оценка экспериментального потепления климата на растительности тундры: неоднородность в пространстве и времени. Ecol. Lett. 15 (2), 164e175. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01716.x>.

Элмendorф, С.К., Генри, Г.Р., Холлистер, Р.Д., Бюрк, Р.Г., Буланже-Лапуант, Н., Купер, Э.Дж., Корнелиссен, Дж.Х.К., Дэй, Т.А., Доррепаал, Э., Элумеева, Т.Г., Гилл, М., Гулд, Вашингтон, Харт, Дж., Хик, Д.С., Хофгаард, А., Джонсон, Д.Р., Джонстон, Дж.Ф., Джонсд Оттир, И.С., Йоргенсон, Дж.К., Кландеруд, К., Клайн, Дж.А., Ко, С., Кудо, Г., Лара, М., Левеск, Э., Магнуссон, Б., Мэй, Х.Л., Меркадо-Диас, Дж.А., Михельсен А., Молау У., Майерс-Смит И.Х., Обербауэр С.Ф., Онипченко В.Г., Риксен, К., Шмидт, Н.М., Шейвер, GR, Спасевич, М.И., Торхалльдс Оттир, Э.Э., Толванен, А., Трокслер, Т., Твиди, СЕ, Виллареаль, С., Варен, К.-Х., Уокер, Х., Веббер, П. Дж., Уэлкер, Дж. М., Випф, С., 2012b. Данные масштаба участка об изменении растительности тундры и связи с недавним летним потеплением. Nat. Clim. Chang. 2, 453e457. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1465>.

Ertl, C., Pessi, A.-M., Huusko, A., Hicks, S., Kubin, E., Heino, S., 2012. Оценка доли «внелокальной» пыльцы с помощью современных аэроботанических и фенологических записей d Пример сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в северной Финляндии. Rev. Palaeobot. Palynol. 185, 1e12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.revpalbo.2012.07.014>.

Eusterhues, K., Lechterbeck, J., Schneider, J., Wolf-Brozio, U., 2002. Поздне- и постледниковая эволюция озера Штайнлинген (J): осадочная история, палинологическая летопись и неорганические геохимические индикаторы. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Палеокол. 187 (3), 341e371. [http://dx.doi.org/10.1016/S0031-0182\(02\)00486-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0031-0182(02)00486-8).

Fall, PL, 1992. Накопление пыльцы в горном регионе Колорадо, США: сравнение моховых подушек, атмосферных ловушек и естественных бассейнов. Rev. Palaeobot. Палинол. 72 (3), 169e197. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-6667\(92\)90026-D](http://dx.doi.org/10.1016/0034-6667(92)90026-D).

Федоров, А., Константинов, П., 2003. Наблюдения за динамикой поверхности при возникновении термокарста, стоянка Юкчи, Центральная Якутия. В: Труды 8-й Международной конференции по вечной мерзлоте. Швейцария, Цюрих, стр. 239–243.

Федотов А.П., Трунова В.А., Енущенко И.В., Воробьева С.С., Степанова О.Г., Петровский С.К., Мельгунов М.С., Зверева В.В., Крапивина С.М., Железнякова Т.О., 2015. 850-летний рекорд климата и растительности изменения в Восточной Сибири (Россия), сделанные на основе геохимических и биологических показателей озера

осадки. Окружающая среда. Науки о Земле. 73 (11), 7297e7314. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-014-3906-1>.

Френч, НМ, 2007. Перигляциальная среда, третье издание. John Wiley & Sons, Чичестер; Англия, стр. 458.

Фегри К., Иверсен Дж., 1989. Учебник по анализу пыльцы. Джон Уайли и сыновья, Чичестер, Англия, стр. 294.

Giesecke, T., Bennett, KD, Birks, HJB, Bjune, AE, Bozilova, E., Feurdean, A., Finsinger, W., Froyd, C., Pokorný, P., Rosch, M., Sepp, a, H., Tonkov, S., Valesch, V., Wolters, S., 2011. Темпы изменения растительности в голоцене: тестирование синхронных изменений. Quat. Sci. Rev. 30 (19), 2805e2814. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.06.014>.

Гольдберг Е.Л., Чебыкин Е.П., Жученко Н.А., Воробьева С.С., Степанова О.Г., Хлыстов О.М., Иванов Е.В., Вайнберг Е., Гвоздов А.Н., 2010. Изотопы урана как индикаторы экологической истории водораздел озера Байкал (Восточная Сибирь) в течение последних 150 тыс. лет. Палеогеограф. Палеоклиматол. Палеоэколог. 294, 16e29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.08.030>.

Gower, JC, 1971. Статистические методы сравнения различных многомерных анализов одних и тех же данных. В: Hodson, FR, Kendall, DG, Tautu, P. (ред.), Mathematics in the Archaeological and Historical Sciences. Edinburgh University Press, Эдинбург, стр. 138-149.

Григорьев, В.Ю., Соколов, Б.Л., 1994. Северная гидрология в бывшем Советском Союзе (FSU). В: Prowse, TD, Ompanney, CSL, Watson, LE (ред.), Северная гидрология: международные перспективы. Научный отчет NHRI № 3. Национальный институт гидрологических исследований, Окружающая среда, Канада, Саскатун, стр. 147-179.

Grimm, EC, 1987. Программа Conissee Fortran-77 для стратиграфически ограниченного кластерного анализа методом инкрементальной суммы квадратов. Comput. Geo-sciences 13 (1), 13e35. [http://dx.doi.org/10.1016/0098-3004\(87\)90022-7](http://dx.doi.org/10.1016/0098-3004(87)90022-7).

Гросс Г., Ширмайстер Л., Зигерт К., Куницкий В.В., Слагода А.А., Андреев А.А., Деревягин А.Ю., 2006. Геолого-геоморфологическая эволюция осадочного перигляциального ландшафта Северо-Восточной Сибири в позднем периоде. Четвертичный период. Геоморфология <http://dx.doi.org/10.1014/j.geomorph.2005.08.005>.

Хаберцеттль, Т., Корбелла, Х., Фей, М., Янссен, С., Люкке, А., Майр, К., Олендорф, К., Шабитц, Ф., Шлезер, ГХ, Вилле, М., Вульф, С., Золичка, Б., 2007. Понедельниковые и голоценовые циклы увлажнения в южной Патагонии: хронология, седиментология и геохимия озерных отложений из лагуны Потрок Айке, Аргентина. <http://dx.doi.org/10.1177/095968360706437>. Голоцен 297e310.

Hahne, J., Melles, M., 1997. История поздней и последниковой растительности и климата юго-западного полуострова Таймыр, Центральная Сибирь, выявленная с помощью анализа пыльцы зерна из озера Лама. Veg. Hist. Archaeobot. 6, 1e8. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01145880>.

Хансен, Б.К.С., 1995. Анализ устьиц хвойных как палеоэкологический инструмент: пример низменностей Гудзонова залива. Can. J. Bot. 73 (2), 244e252. <http://dx.doi.org/10.1139/b95-027>.

Хаук, М., Дуламсурэн, К., Хеймс, К., 2008. Влияние травоядности насекомых на производительность Larix sibirica в лесостепном экотоне. Environ. Exper. Bot. 62 (3), 351e356. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enxepbot.2007.10.025>.

Хикс, С., 2006. Когда нет пыльцы, это не значит, что нет деревьев. Veg. Hist. Archaeobot. 15, 253e261. <http://dx.doi.org/10.1007/s00334-006-0063-9>.

Хинцман, Л.Д., Дил, Сиджей, Макгуайр, А.Д., Мерниль, С.Х., Поляков, И.В., Уолш, Дж.Э., 2013. Траектория Арктики как целостной системы. Ecol. Appl. 23 (8), 1837-1868. <http://dx.doi.org/10.1890/11-1498.1>.

Хультен, Э., Фрис, М., 1986. Атлас сосудистых растений Северной Европы (к северу от тропика Рака). т. 1. Koeltz Scientific Books, Кенигштайн, Германия, стр. 40-41.

IPCC, Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fifehet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, WJ, Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, AJ, Wehner, M., 2013. Долгосрочное изменение климата: прогнозы, обязательства и необратимость (глава 12). В: Stocker, TF, Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, SK, Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, PM (ред.), Изменение климата 2013: Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Cambridge University Press, Кембридж, Соединенное Королевство и Нью-Йорк, штат Нью-Йорк, США, стр. 1029-1136.

Джексон, Д., 1995. ПРОТЕСТ: ПРОКРУСТОВЫЙ ТЕСТ-РАНДОЗИРОВКА соответствия среды сообщества. Ecoscience 2, 297e303.

Joosten, H., de Klerk, P., 2002. Что в имени? Некоторые мысли о классификации, идентификации и номенклатуре пыльцы в палинологии четвертичного периода. Rev. Палеобот. Палинол. 122, 29e45. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-6667\(02\)00090-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-6667(02)00090-8).

Джаггинс, С., 2014. Риоха: Анализ данных четвертичной науки, версия пакета R 0.9-3. <http://cran.r-project.org/package=rrioja>.

Калугин, И., Дарин, А., Смольянинова, Л., Андреев, А.А., Дикманн, Б., Хлыстов, О., 2007. 800-летние записи годовой температуры воздуха и осадков над югом Сибири, полученные из отложений Телецкого озера. Quat. Res. 67 (3), 400e410. <http://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2007.01.007>.

Каневский, М., Йоргенсон, Т., Шур, Ю., О'Доннелл, Дж. А., Харден, Дж. В., Чуан, К., Фортъе, Д., 2014. Криволинейная и эволюция вечной мерзлоты в озерных низинах западно-центральной Аляски. Permafrost. Periglacial. Process 25 (1), 14e34. <http://dx.doi.org/10.1002/ppp.1800>.

Кауфман, Д.С., Агер, Т.А., Андерсон, Нью-Джерси, Андерсон, ПМ, Эндрюс, Дж.Т., Бартлейн, П.Дж., Бруйекей, Л.Б., Коутс, Л.Л., Квинан, Л.К., Доваль, М.Л., Дайк, А.С., Эдвардс, М.Э., Эйсер, В.Р., Гаевски К., Гейрсдоттир А., Ху, Ф.С., Дженнингс А.Е., Каплан, М.Р., Кервин, М.В., Ложкин, А.В., Макдональд, ГМ, Миллер, Г.Х., Мок, Сиджей,

Oswald, WW, Otto-Bliesner, BL, Porinchu, DF, Rühland, K., Smol, JP, Steig, EJ, Wolfe, BB, 2004. Голоценовый термический максимум в западной Арктике (0e180W). Quat. Sci. Rev. 23, 529e560. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.09.007>.

Кервин, М., Оверпек, Дж. Т., Уэбб, Р. С., ДеВернал, А., Рин, Д. Х., Хили, Р. Дж., 1999. Роль океанического воздействия в изменении климата в северном полушарии в середине голоцена. Палеоокеанология 14, 200e210. <http://dx.doi.org/10.1029/1998PA900011>.

Харук В.И., Рансон К.Дж., Им, С.Т., Оскорбин П.А., Двинская М.Л., Овчинников Д.В., 2013. Древовидная структура и динамика на северной окраине лиственничного леса: Анабарское плато, Сибирь, Россия. Аркт. Антарк., Альп. Рез. 45 (4), 526e537. <http://dx.doi.org/10.1657/1938-4246-45.4.526>.

Клейнен, Т., Тарасов, П., Бровкин, В., Андреев, А.А., Стебич, М., 2011. Сравнение смоделированных и реконструированных изменений лесного покрова за последние 8000 лет: евразийская перспектива. Голоцен 21, 723e734. <http://dx.doi.org/10.1177/0959683610386980>.

Клемм Дж., Герцшу У., Писарик М.Ф.Дж., Телфорд Р.Дж., Хайм Б., Пестрякова Л.А., 2013. Функция переноса пыльцы в климат от тундровой и таежной растительности Арктической Сибири и ее применимость к данным голоцена. Палеогеогр. Палеоклиматол. Палеоэколог. 702e713. <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.06.033>.

Койниг, К.А., Шотык, В., Лоттер, А.Ф., Олендорф, К., Штурм, М., 2003. 9000 лет геохимической эволюции литогенных основных и микроэлементов в отложениях высокогорного озера с учетом роли климата, растительности и истории землепользования. J. Paleolimnol. 30 (3), 307e320. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1026080712312>.

Кременецкий, К.В., Лю, К., Макдональд, Г.М., 2000. Позднечетвертичная динамика сосен в Северной Азии. В: Ричардсон, Д.М. (ред.), Экология и биогеография сосны. Cambridge University Press, стр. 95-106.

Кумке, Т., Кинель, У., Векстром, Дж., Корхола, А., Хуббертен, Х.-В., 2004. Предполагаемые палеотемпературы голоцена по диатомовым водорослям в озере Лама, Центральная Сибирь. Арктика. Антарктида, Альп. Резолюция 36 (4), 624e634. [http://dx.doi.org/10.1657/1523-0430\(2004\)036\[0624:HPFDAJ\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1657/1523-0430(2004)036[0624:HPFDAJ]2.0.CO;2).

Кайландер, М. Э., Ампель, Л., Вольфарт, Б., Верес, Д., 2011. Анализ зерна с помощью рентгеновской флуоресценции высокого разрешения в осадочной последовательности Лэ-Эше (Франция): новые сведения из химических прокси-факторов. J. Quat. Sci. 26 (1), 109e117. <http://dx.doi.org/10.1002/jqs.1438>.

Лежандр, П., Галлахер, Э.Д., 2001. Экологически значимые преобразования для ординации данных о видах. Oecologia 129, 271e280. <http://dx.doi.org/10.1007/s004420100716>.

Лентон, ТМ, 2012. Переломные моменты арктического климата. Ambio 41 (1), 10e22. <http://dx.doi.org/10.1007/s13280-011-0221-x>.

Лисицына, О.В., Гизеке, Т., Хикс, С., 2011. Изучение пороговых значений процентного содержания пыльцы как показателя регионального присутствия основных европейских деревьев. Rev. Палеобот. Palynol. 166 (3), 311e324. <http://dx.doi.org/10.1016/j.revpalbo.2011.06.004>.

Lowemark, L., Chen, H.-F., Yang, T.-N., Kylander, M., Yu, E.-F., Hsu, Y.-W., Lee, T.-Q., Song, S.-R., Jarvis, S., 2011. Нормализация данных рентгеновского флуоресцентного сканера: предупреждение по интерпретации записей высокого разрешения из богатых органикой озер. J. Asian Earth Sci. 40, 1250e1256. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseae.2010.06.002>.

Luoto, TP, Kaukohehto, M., Weckstrom, J., Korhola, A., Valiranta, M., 2014. Новые доказательства теплого лета в раннем голоцене в субарктической Финляндии на основе улучшенной региональной модели климатической температуры на основе хирономид. Quat. Res. 81, 50e62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2013.09.010>.

Макдональд, ГМ, Величко, А.А., Кременецкий, К.В., Борисова, К.К., Голева, А.А., Андреев, А.А., Цвинар, Л.К., Райдинг, РТ, Форман, С.Л., Эдвардс, Т.В.Д., Аравена, Р., Хаммарлунд, Д., Зейц Дж., Гаттаулин В.Н., 2000а. История голоценовых лесов и изменение климата на севере Евразии. Кват. Рез. 53, 302e311. <http://dx.doi.org/10.1006/qres.1999.2123>.

MacDonald, G., Felzer, B., Finney, B., Forman, S., 2000b. Записи голоценовых озерных осадков арктической гидрологии. J. Paleolimnol. 24 (1), 1e13. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1008100714795>.

MacDonald, GM, Kremenetski, KV, Beilman, DW, 2008. Изменение климата и северная граница леса в России. Philos. Trans. R. Soc. B 363, 2285e2299. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2007.2200>.

Манн, М.Е., Чжан, З.Х., Резерфорд, С., Брэдли, Р.С., Хьюз, М.К., Шинделл, Д., Амманн, К., Фалуеги, Г, Ни, Ф.Б., 2009. Глобальные сигнатуры и динамические истоки малого ледникового периода и средневековой климатической аномалии. Science 326 (5957), 1256e1260. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1177303>.

Manning, MR, Lowe, DC, Melhuish, WH, Sparks, RJ, Wallace, G., Brenninkmeijer, CAM, McGill, RC, 1990. Использование измерений радиоуглерода в атмосферных исследованиях. Radiocarbon 32 (1), 37e58.

Marcott, SA, Shakun, JD, Clark, PU, Mix, AC, 2013. Реконструкция региональной и глобальной температуры за последние 11 300 лет. Science 339 (6124), 1198e1201. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1228026>.

Маккей, Н. П., Кауфман, Д. С., 2014. Расширенная база данных косвенных данных о температуре в Арктике за последние 2000 лет. Sci. Data 1, 140026. <http://dx.doi.org/10.1038/sdata.2014.26>.

Мейерс, П. А., Лалье-Вержес, Э., 1999. Записи озерного осадочного органического вещества позднечетвертичных палеоклиматов. J. Paleolimnol. 21 (3), 345e372. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1008073732192>.

Мейерс, П.А., Теранес, Дж.Л., 2001. Органическое вещество осадка. В: Ласт, В.М., Смол, Дж.П. (ред.), Отслеживание изменений окружающей среды с использованием озерных отложений, физические и геохимические методы, т. 2. Kluwer Academic Publishers, Дордрехт, Нидерланды, стр. 239-269.

Миллер, Г.Х., Бригам-Гретт, Дж., Элли, Р.Б., Андерсон, Л., Баух, Х.А., Дуглас, МСВ, Эдвардс, М.Э., Элиас, С.А., Финни, Б.П., Фитцпатрик, Дж.Дж., Фундер, С.В., Герберт, ТД,

- Hinzman, LD, Kaufman, DS, MacDonald, GM, Polyak, L., Robock, A., Serreze, MC, Smol, JP, Spielhagen, R., White, JWC, Wolfe, AP, Wolff, EW, 2010. История температуры и осадков в Арктике. *Quat. Sci. Rev.* 29, 1679e1715. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.03.001>.
- Монсеруд, Р.А., Чебакова, Н.М., Денисенко, О.В., 1998. Реконструкция палеоклимата среднего голоцена Сибири с использованием биоклиматической модели растительности. *Палеогеогр. Палеоклиматол. Палеоэкол.* 139, 15e36. [http://dx.doi.org/10.1016/S0031-0182\(97\)00127-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0031-0182(97)00127-2).
- Мур, П. Д., Уэбб, Дж. А., Коллисон, М. Э., 1991. Анализ пыльцы, второе издание. Блэквелл Научные публикации, стр. 216.
- Моргенштерн, А., Гроссе, Г., Гюнтер, Ф., Федорова, И., Ширрмайстер, Л., 2011. Пространственный анализ термокарстовых озер и бассейнов в ландшафтах едомы дельты Лены. *Криосфера* 5, 1495e1545. <http://dx.doi.org/10.5194/tcd-5-1495-2011>.
- Murton, JB, 2001. Термокарстовые отложения и осадочные структуры, побережье Туктояк-тук, западная арктическая часть Канады. *Glob. Planet. Chang.* 28 (1), 175e192. [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8181\(00\)00072-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8181(00)00072-2).
- Мюлламаа, У., Муртониemi, С., 1986. Металлы и питательные вещества в отложениях малых озер в Куусамо, северо-восточная Финляндия. *Publ. Water Res. Inst.* 69, 33e48.
- Naeher, S., Gilli, A., North, RP, Hamann, Y., Schubert, CJ, 2013. Отслеживание насыщения кислородом придонных вод с помощью осадочных соотношений Mn/Fe в Цюрихском озере. *Switz. Chem. Geol.* 352, 125e133. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.06.006>.
- Наурузбаев, М.М., Ваганов, Е.А., 2000. Изменение ранней летней и годовой температуры на Восточном Таймыре и Пutorане (Сибири) за последние два тысячелетия, выведенное из годовичных колец деревьев. *J. Geophys. Res.* 105 (D6), 7317e7326.
- Нимейер, Б., Клемм, Дж., Пестрякова, Л.А., Герцшу, У., 2015. Относительные оценки пыльцевой продуктивности для обычных таксонов северной части. *Sib. Arct. Rev. Palaeobot. Palynol.* 221, 71e82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.revpalbo.2015.06.008>.
- Och, LM, Müller, B., Voegelin, A., Ulrich, A., Gottlicher, J., Steiniger, R., Mangold, S., Vologina, EG, Sturm, M., 2012. Новые взгляды на формирование и захоронение скоплений Fe/Mn в осадках озера Байкал. *Химия и геол.* 330–331, 244–259. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.09.011>.
- Оксанен Дж., Бланше Ф.Г., Киндт Р., Лехандр П., Минчин П.Р., О'Хара РБ, Симпсон Г.Л., Солимос П., Стивенс МХХ, Вагнер Х., 2015. Vegan : Экологический пакет сообщества. Пакет R версии 2.2-1. <http://CRAN.R-project.org/package%3Dvegan>.
- Павлов, Б.М., Колпацников, Л.А., Зырянов, В.А., 1996. Динамика численности популяции северного оленя Таймыра. *Rangifer* 16 (4), 381–384. <http://dx.doi.org/10.7557/2.16.4.1281>.
- Пирсон, РГ, Филлипс, С.Дж., Лоранти, М.М., Бек, П.С., Дамулас, Т., Найт, С.Дж., Гетц, С.Дж., 2013. Изменения в арктической растительности и связанные с ними обратные связи при изменении климата. *Nat. Clim. Chang.* 3 (7), 673e677. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1858>.
- Перевоич, Б., Хупс, Э., Рахольд, В., 1999. Перенос осадков в море Лаптевых (Сибирская Арктика) в голоцене: доказательства тяжелого минерального состава речных и морских осадков. *Борей* 28, 205e214. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00215.x>.
- Перес-Нето, П., Джексон, Д., 2001. Насколько хорошо совпадают многомерные наборы данных? Преимущества подхода прокрустовой суперпозиции над тестом Мантеля. *Экология* 129 (2), 169–178. <http://dx.doi.org/10.1007/s004420100720>.
- Петров, О.В., 2008. Геологическая карта России и прилегающих акваторий, 1: 2 500 000. Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. Л.Я. Карпинского (ВСГЕИ), Москва, Россия, 12 листов.
- Питканен А., Турунен Дж., Тахванайнен Т., Толонен К., 2002. История голоценовой растительности Салым-Юганского болота, Западная Сибирь. *Голоцен* 12 (3), 353e362. <http://dx.doi.org/10.1191/095968399662hl533rp>.
- Поска А.А., Мельцов В., Сугита С., Васильев Дж., 2011. Относительная оценка продуктивности пыльцы основных анемофильных таксонов и соответствующая область источника пыльцы в культурном ландшафте полубореальной лесной зоны (Эстония). *Преподобный Палеобот.* 167 (1e2), 30e39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.revpalbo.2011.07.001>.
- Поспелова Е.Б., Поспелов И.Н., Жулидов А.В., Робартс Р.Д., Жулидова О.В., Жулидов Д.А., Гуртова Т.Ю., 2004. Биогеография гор Бырранга, полуостров Таймыр, Российская Арктика. *Полярная запись*, 40, 327e344.
- Prentice, IC, Webb III, T., 1998. BIOME 6000: реконструкция глобальных моделей растительности среднего голоцена по палеоэкологическим данным. *J. Biogeogr.* 25, 997e1005.
- R Core Team, 2013. R: Язык и среда для статистических вычислений. Фонд R для статистических вычислений, Вена, Австрия. <http://www.R-project.org/>.
- Рахольд, В., Эйзенхауэр, А., Хуббертен, Х.-В., Хансен, Б., Мейер, Х., 1997. Изотопный состав Sr взвешенных частиц (ВЧМ) рек Восточной Сибири: перенос осадков в Северный Ледовитый океан. *Arct. Alp. Res.* 29, 422e429.
- Рейль, М., 1998. Пыльца и споры Европы и Северной Африки. *Лаборатория де Botanique Historique et Palynologie, Марсель*, с. 515.
- Reimer, PJ, Bard, E., Bayliss, A., Beck, JW, Blackwell, PG, Bronk Ramsey, C., Buck, CE, Cheng, H., Edwards, RL, Friedrich, M., Grootes, PM, Guilderson, PT, Hafidason, H., Hajdas, I., Hatt, C., Heaton, TJ, Hoffmann, DL, Hogg, AG, Hughen, KA, Kaiser, KF, Kromer, B., Manning, SW, Niu, M., Reimer, RW, Richards, DA, Scott, EM, Southon, JR, Staff, RA, Turney, CSM, van der Plicht, J., 2013. Кривые калибровки радиоуглеродного возраста IntCal13 и Marine13 0–50 000 лет назад. *Радиоуглерод* 55 (4), 1869–1887. [http://dx.doi.org/10.2458/azu\\_js\\_rc.55.16947](http://dx.doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947).
- Романовский Н.Н., Хуббертен Х.-В., Гаврилов А.В., Тумской В.Е., Холодов А.Л. 2004. Вечная мерзлота восточно-сибирского арктического шельфа и прибрежных низменностей. *Кварт.* Sci. Rev. 23, 1359–1369. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.12.014>. а, М., Култи, С., Салонен, Й.С., Сеппе, Х., Валиранта, М., Джонс, В.Дж., Селф, А., Хейккиль
- Янг, Х., 2011. Голоценовый термический максимум и позднеголоценовое похолодание в тундре северо-востока Европейской России. *Quat. Res.* 75, 501e511. <http://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2011.01.007>.
- Савельева, Л.А., Рашке, Е.А., Титова, Д.В., 2013. Фотографический атлас растений и пыльцы реки Лены. Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, стр. 113.
- Ширрмайстер, Л., Фрезе, Д., Тумской, В., Гроссе, Г., Веттерих, С., 2013. Едома: богатая льдом сингенетическая вечная мерзлота позднего плейстоцена Берингии. В: Элиас, С. А. (ред.), *Энциклопедия четвертичной науки*, т. 3. Elsevier, Амстердам, стр. 542–552.
- Serreze, MC, Barrett, AP, Stroeve, JC, Kindig, DN, Holland, MM, 2009. Возникновение поверхностного арктического усиления. *Криосфера* 3, 11e19. <http://dx.doi.org/10.5194/tc-3-11-2009>.
- Шахгеданова, М., Михайлов, Н., Ларин, С., Мерзлякова, А., 2002. Горы северной России. В: Шахгеданова, М. (ред.), *Физическая география Северной Евразии*. Oxford University Press, Нью-Йорк, стр. 284–313.
- Шала, С., Хелменс, К.Ф., Янссон, К.Н., Киландер, М.Э., Рисберг, Дж., Лоумарк, Л., 2014. Палеоэкологические данные об эволюции ледникового озера в раннем голоцене в Сокли, северо-восточная Финляндия. *Борей* 43, 362e376.
- Сидорова О.В., Зигвольф Р.Т.В., Заурер М., Шашкин А.В., Кнорре А.А., Прокушкин А.С., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., 2009. Тенденции столетних годовичных колец и стабильных изотопов Larix gmelinii (Rupr.) Rupr. свидетельствуют об увеличении дефицита воды на сибирском севере? *Экология* 161 (4), 825e835. <http://dx.doi.org/10.1007/s00442-009-1411-0>.
- Симола, Х., 1983. Лимнологические эффекты осушения и удобрения торфяников, отраженные в ленточных отложениях глубокого озера. *Hydrobiologia* 106 (1), 43e57. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00016415>.
- Симпсон, Г.Л., Оксанен, Дж., 2014. Аналог: аналоговое соответствие и модели передаточной функции современной аналоговой техники, версия пакета R 0.16-0. <http://cran.r-project.org/package%3Danalogue>.
- Смит, Л.С., Шэн, И., Макдональд, Г.М., Хинцман, Л.Д., 2005. Исчезающие арктические озера. *Science* 308 (5727), 1429. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1108142>.
- Stockmarr, J., 1971. Таблетки со спорами, используемые в абсолютном анализе пыльцы. *Pollen Spores* 13, 615e621.
- Стоун, Т.А., Шлезингер, П., 1993. Оцифровка карты «Растительность Советского Союза, 1990»: отчет Северо-восточной лесной экспериментальной станции. Лесная служба Министерства сельского хозяйства США, Программа исследований глобальных изменений, Раднор, Пенсильвания . [ftp://daac.cornl.gov/data/russian\\_land\\_cover/vegetation\\_1990/comp/vmap90\\_method.pdf](ftp://daac.cornl.gov/data/russian_land_cover/vegetation_1990/comp/vmap90_method.pdf).
- Сугита, С., 1994. Пыльцевое представление растительности в четвертичных отложениях: теория и метод в пятнистой растительности. *J. Ecol.* 82 (4), 881e897. <http://dx.doi.org/10.2307/2261452>.
- Сугита, С., Гайяр, М.-Дж., Бростром, А., 1999. Открытость ландшафта и пыльцевые записи: подход моделирования. *Голоцен* 9, 409e421. <http://dx.doi.org/10.1191/09596839966429937>.
- Свендсен Дж.И., Александерсон Х., Астахов В.И., Демидов И., Даудсвелл Дж.А., Фундер С., Гатауллин В., Хенриксен М., Йорт К., Хоумарк-Нильсен М., Хуббертен, Х.-В., Ингольффсон О., Якобссон М., Кьер, К.Х., Ларсен, Э., Локранц Х., Лунка Дж. П., Лиса А., Мангеруд Ю., Матючков А., Мюррей А., Моллер П., Ниссен Ф., Нильская О., Поляк Л., Сааристо М., Зигерт К., Зигерт М.Дж., Шпиляхаген Р.Ф., Штейн Р., 2004. Поздно Четвертичная история ледникового покрова Северной Евразии. *Quat. Sci. Rev.* 23, 1229e1271. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.12.008>.
- Тарасов П.Е., Уэбб Т., Андреев А.А., Афанасьева Н.Б., Березина Н.А., Безуско Л.Г., Бляхарчук Т.А., Болиховская Н.-С., Чеддади Р., Чернавская М.М., Чернова, Г.М., Дорофеев Н.И., Дирксен В.Г., Элина Г.А., Филимонова Л.В., Глебов Ф.З., Гюно В.С., Харрисон С.П., Джолли Д., Хомотова В.И., Каввадзе Е.В., Осипова И.М., Панова Н.К., Прентис И.С., Саарс Л., Севастьянов Д.В., Волкова В.С., Зерницкая В.П., 1998. Современные и среднеголоценовые биомы, реконструированные по данным о пыльце и макроиспаемых растений из Бывший Советский Союз и Монголия. *J. Biogeogr.* 25, 1029e1053.
- Тарасов, П., Уильямс, Дж. В., Андреев, А. А., Накагава, Т., Безрукова, Э., Герцшу, У., Игараси, И., Мюллер, С., Вернер, К., Чжэн, Э., 2007. Количественные реконструкции древесного покрова на основе спутниковых и пыльцевых данных для северной Азии: проверка и применение к позднечетвертичным данным по пыльце. *Earth Planet. Sci. Lett.* 264 (1e2), 284e298. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2007.10.007>.
- Чебакова, Н.М., Парфенова, Е.И., 2012. Влияние изменения климата в 21 веке на леса и первичные хвойные породы в Центральной Сибири. *Bosque* 33 (3), 253e259. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-9202012000300004>.
- Команда CAVM, 2003. Карта циркумполярной арктической растительности. (Масштаб 1:7 500 000), Карта № 1 Службы охраны арктической флоры и фауны (CAFF). Служба охраны рыбных ресурсов и диких животных США, Анкоридж, Аляска.
- Телфорд, Р. Дж., 2015. PalaeoSig: Тесты значимости количественных палеоэкологических реконструкций, пакет R версии 1.1-3. <http://cran.r-project.org/package%3DpalaeoSig>.
- Телфорд, Р. Дж., Биркс, Х. Дж. Б., 2011. Новый метод оценки статистической значимости количественных реконструкций, полученных из биотических сообществ. *Quat. Sci. Rev.* 30 (9), 1272–1278. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.03.002>.
- Тишков, А., 2002. Бореальные леса. В: Шахгеданова, М. (ред.), *Физическая география Северной Евразии*. Oxford University Press, Нью-Йорк, стр. 216–233.
- Трешников А.Ф., 1985. Атлас Арктики. Главное управление геодезии и картографии, Москва: Россия, с. 204 (на русском языке).
- Тернер, К. У., Вулф, Б. Б., Эдвардс, Т. У., Ланц, Т. К., Холл, Р. И., Ларок, Г., 2014. Контроль водного баланса мелководных термокарстовых озер и их связь с характеристиками водосбора: многолетняя оценка ландшафтного масштаба на основе изотопных трассеров воды и дистанционного зондирования в Олд-Кроу-Флэтс, Юкон (Канада).



- Global Chang Biol. 20 (5), 1585-1603. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.12465>. Ван Хуистеден Дж., Беррителла К., Парментье Ф.Дж.В., Ми Ю., Максимов Т.С., Долман А.Дж., 2011. Выбросы метана из талых озер вечной мерзлоты, ограниченные дренажем озер. Нат. Клим. Чанг. 1(2), 119e123. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1101>.
- Васског, К., Пааше, О., Несье, А., Бойл, Дж. Ф., Биркс, Х. Дж. Б., 2012. Новый подход к реконструкции изменчивости ледников на основе озерных отложений, регистрирующих поступление воды от более чем одного ледника. Quat. Res. 77 (1), 192e204. <http://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2011.10.001>.
- Верниковский В.А., Добрецов Н.Л., Метелкин Д.В., Матушкин Н.Ю., Кулаков И.Ю. К тектонике и тектоническому развитию Арктики // Геол. Геофиз. 54 (8), 838e858. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2013.07.006>. фон Стедингк, Х., Файф, Р.М., Аллард, А., 2008. Оценки пылевой продуктивности из экотона лесотундры в западно-центральной части Швеции: последствия для реконструкции растительности на границах бореального леса. Голоцен 18 (2), 323e332. <http://dx.doi.org/10.1177/0959683607086769>.
- Вахснер, М., Мюллер, К., Штайн, Р., Иванов, Г., Левитан, М., Шелехова, Е., Тарасов, Г., 1999. Распределение глинистых минералов в поверхностных отложениях Евразийского Северного Ледовитого океана и континентальной окраины как индикатор областей источников и путей переноса — синтез. Борей 28 (1), 215e233. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00216.x>.
- Ваннер, Х., Бир, Дж., Бутикофер, Дж., Кроули, Т.Дж., Кубаш, У., Флюкигер, Дж., Гуссе, Х., Грожан, М., Йоос, Ф., Каплан, Дж.О., Кюттель, М., Мюллер С.А., Прентис И.С., Соломина, О., Стокер, Т.Ф., Тарасов, П., Вагнер, М., Видман, М., 2008. Изменение климата в середине и конце голоцена: обзор. Quat. Sci. Rev. 27 (19), 1791-1828. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.06.013>.
- Weltje, J., 1997. Моделирование конечных элементов композиционных данных: численно-статистические алгоритмы для решения явной проблемы смешивания. Math. Geol. 29 (4), 503e549. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02775085>.
- Weltje, J., Prins, MA, 2007. Генетически значимое разложение распределений размеров зерен. Sediment. Geol. 202 (3), 409e424. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.03.007>.
- Weltje, GJ, Tjallingii, R., 2008. Калибровка сканеров ядра XRF для количественного геохимического каротажа кернов осадочных пород: теория и применение. Планета Земля. Письма Sci. 274 (3), 423e438. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.054>.
- Wischnewski, J., Kramer, A., Kong, Z., Mackay, AW, Simpson, GL, Mischke, S., Herzsuh, U., 2011. Реакция наземных и водных организмов на изменение климата и воздействие человека на юго-восточное Тибетское плато в течение последних двух столетий. Glob. Chang. Biol. 17 (11), 3376e3391. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02474.x>.
- Юрцев Б.А., 1994. Флористическое районирование Арктики. Журнал растительных наук, 5 (6), 765-776. <http://dx.doi.org/10.2307/3236191>.
- Цзэн, И., Чэнь, Дж., Сяо, Дж., Ци, Л., 2013. Неостаточный Sr в отложениях озера Дайхай как хороший индикатор химического выветривания. Quat. Res. 79 (2), 284e291. <http://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2012.11.010>.