Геосферные исследования. 2021. № 1. С. 49–60

ПАЛЕОНТОЛОГИЯ, СТРАТИГРАФИЯ

УДК 551.794+581.524(571.54)

ИСТОРИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ БАССЕЙНА ОЗЕРА ИЛЬЧИР (ВОСТОЧНЫЙ САЯН) ЗА ПОСЛЕДНИЕ 8 500 ЛЕТ

Е.В. Волчатова[1], Е.В. Безрукова[1, 2, 3], Н.В. Кулагина[1, 2], Е.В. Кербер[1], С.А. Решетова[1], А.А. Щетников[1, 2], И.А. Филинов[2]

[1]*Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия*
[2]*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия*
[3]*Иркутский научный центр СО РАН, Иркутск, Россия*

Результаты палинологического анализа донных отложений озера Ильчир стали основой реконструкции растительности и климата в котловине и бассейне озера, понимания процесса развития природной среды района в среднем–позднем голоцене. Высокое временное разрешение и надежная возрастная модель новой палинологической записи являются уникальными для Восточного Саяна, позволяя проводить внутри- и межрегиональные корреляции изменений природной среды для понимания возможных причин палеоэкологических сдвигов.

Ключевые слова: *спорово-пыльцевой анализ, растительность, климат, голоцен.*

Введение

Саяны – крупная горная система, занимающая обширные территории Южной Сибири и части Северной Монголии; они простираются на восток до озера Байкал, а на западе их продолжением является Алтай. Район исследования приурочен к Ильчирскому грабену на границе Окинского плато и Тункинских Гольцов (рис. 1). Фундамент озерного водосбора слагают докайнозойские метаморфические и неогеновые вулканические породы, частично перекрытые ледниковыми отложениями позднего плейстоцена [Mackay et al., 2012].

Ильчирский грабен со всех сторон окружен высокими хребтами, что обусловливает особый тип климатического режима [New et al., 2002]. Климат характеризуется средней июльской температурой +11 °С и средней январской температурой –26 °С. Минимальные температуры часто опускаются ниже 40 °С, а максимальные летние температуры могут превышать 25 °С. Среднегодовая температура не превышает –6,6 °С. Среднегодовое количество осадков составляет около 400 мм, из которых только 10 % выпадает в холодное время года с октября по март. Поверхностные воды озера Ильчир могут прогреваться до +15 °С в июле. С октября по июнь озеро покрыто льдом [Bondarenko et al., 2002].

Современная растительность в горах Восточного Саяна имеет четкое высотное зонирование. Пихта *Abies sibirica* Ledeb., ель *Picea obovata* Ledeb. и сосна сибирская *Pinus sibirica* Du Tour доминируют на высотах ниже 1 000 м над ур. м. Сосна сибирская и лиственница *Larix sibirica* Ledeb. преобладают в интервале высот 1 000 и 1 800–2 000 м. Кустарники, в том числе виды кустарниковой березки *Betula* sect. Nanae L., ольхи кустарниковой *Duschekia fruticosa* (Rupr.) Pouzar и Ericales, распространены в нижнем ярусе темнохвойных лесов и в субальпийском поясе над линией деревьев. Леса из сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. занимают более теплые и сухие места обитания в восточной части Саян на низких высотных уровнях и на предгорных равнинах. В растительности котловины озера Ильчир преобладают редкие лиственницы с подлеском из кустарниковой березки, наземным покровом из лишайников рода *Cladonia* Hill ex P. Browne и мхов рода *Sphagnum* L. Участки мохово-лишайниковой тундры чередуются с пятнами осоково-злаковых и кобрезиевых *Kobresia myosuroides* (Vill.) Fiori, *Minuartia arctica* (Steven ex Ser.) Graevn., *Carex ledebouriana* (C.A. Mey. ex Trev. Worosch., *C. Rupestris All.*) травяных лугов в понижениях рельефа. На плоских склонах южной экспозиции можно встретить луговины из *Valeriana capitata* Pall. ex Link, *Trollius asiaticus* L., *Allium schoenoprasum* L., *Primula nivalis* Pall. В прибрежной части озера растут макрофиты, в том числе виды рода *Carex* L. и *Potamogeton* spp. [Холбоева, 2011; Mackay et al., 2012].

© Волчатова Е.В., Безрукова Е.В., Кулагина Н.В., Кербер Е.В., Решетова С.А., Щетников А.А., Филинов И.А., 2021
DOI: 10.17223/25421379/18/4

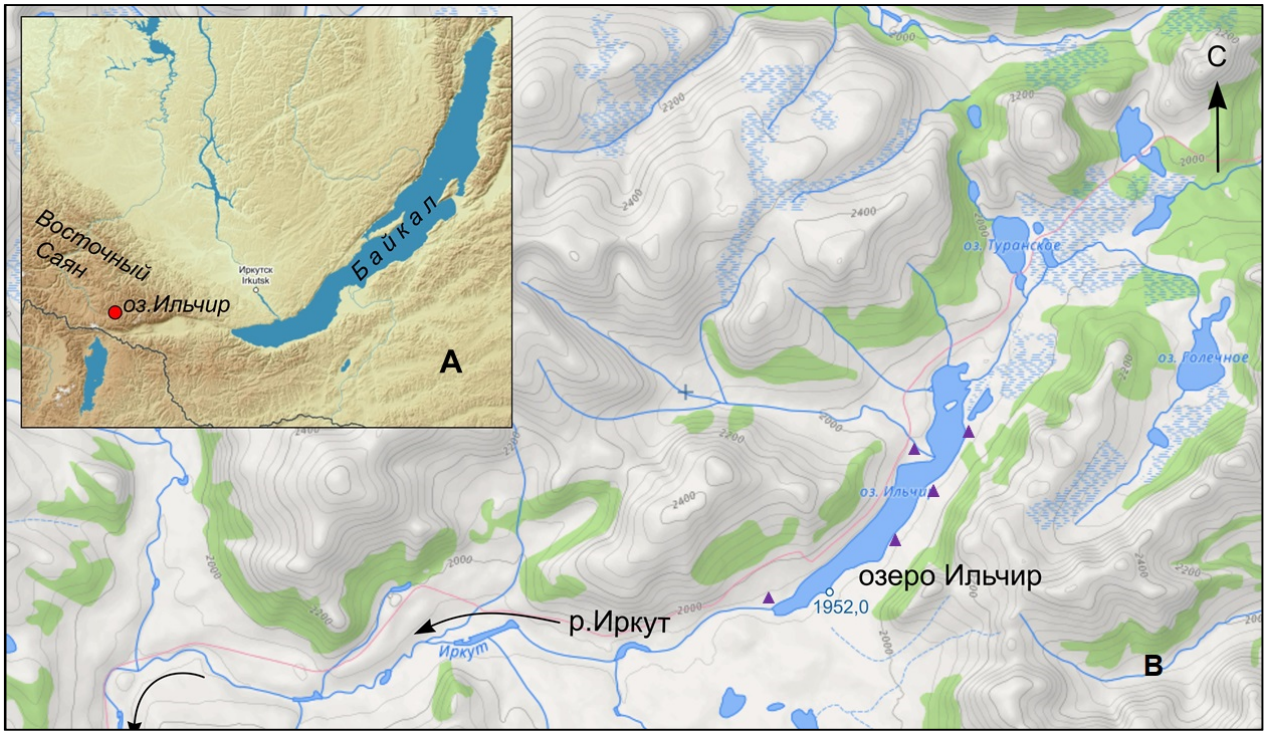

Рис. 1. Местонахождение озера Ильчир

А – общее положение озера в горах Восточного Саяна; В – котловина озера с впадающими в него безымянными постоянными водотоками; красными треугольниками отмечены точки отбора поверхностных проб в прибрежной полосе озера

Fig. 1. Location of Lake Ilchir

A – general position of Lake Ilchir in the East Sayan mountains; B – the Lake Ilchir basin with a streams flowing into it; red triangles mark points of surface pollen samples

Материалы и методы исследования

Донные отложения озера Ильчир были пробурены в 2013 г., длина керна составила 132 см.

Палинологический анализ. Керн был опробован в лабораторных условиях Института геохимии СО РАН (г. Иркутск). Для целей палинологического анализа был опробован каждый второй сантиметр, что в сумме составило 67 образцов. Для экстракции пыльцы и спор в лабораторных условиях образец естественной влажности подвергался стандартной процедуре обработки [Berglund, Ralska-Jasiewiczowa, 1986], этапы которой заключались в следующем: до начала обработки каждый образец объемом в 1,5 г влажного осадка помещали в стеклянный стакан и добавляли несколько капель разбавленной соляной кислоты (HCl) для обнаружения карбоната кальция.

Этот этап показал, что образцы из донных отложений озера Ильчир не содержат такового, поэтому далее применялась следующая процедура. Осадок отмывали 2–3-разовым центрифугированием, затем добавляли 10 %-й гидроксид калия (KOH) и помещали стаканы на 10–15 мин в водяную баню с температурой 80 °С. На этом этапе происходила дезагрегация матрицы осадка и растворение гуминовых кислот. Далее остывшую смесь растворенного в KOH осадка пропускали через сито с ячеей 120 мкм, при этом пыльцевые зерна и споры проходили через сито. Суспензия, прошедшая через сито, собиралась в полипропиленовые центрифужные пробирки, промывалась трехкратным центрифугирования на скорости около 3 000 об./мин на протяжении 3 мин. Затем проходила обработка 40 %-й плавиковой кислотой (HF) в электрической водяной бане 45 мин – 4 ч при температуре 80 °С в зависимости от того, когда на дне пробирок не останется твердой фракции. После остывания проводили центрифугирование с добавлением слабого раствора соды до нейтральной реакции лакмуса. Конечный осадок переносился в 5-миллиметровые пластиковые пробирки.

Безводный глицерин использовали для хранения образцов и подготовки предметных стекол. Пыльцу и споры идентифицировали при увеличении ×400, ×600 и ×1 000 с помощью опубликованных определителей пыльцы и атласов [Куприянова, Алешина, 1978; Бобров и др., 1983; Moore et al., 1991].

В качестве современных или субрецентных спорово-пыльцевых спектров (СПС) мы рассматриваем пять спектров, полученных из илов у уреза воды в озере (см. рис. 1). Их состав приведен на рис. 2.

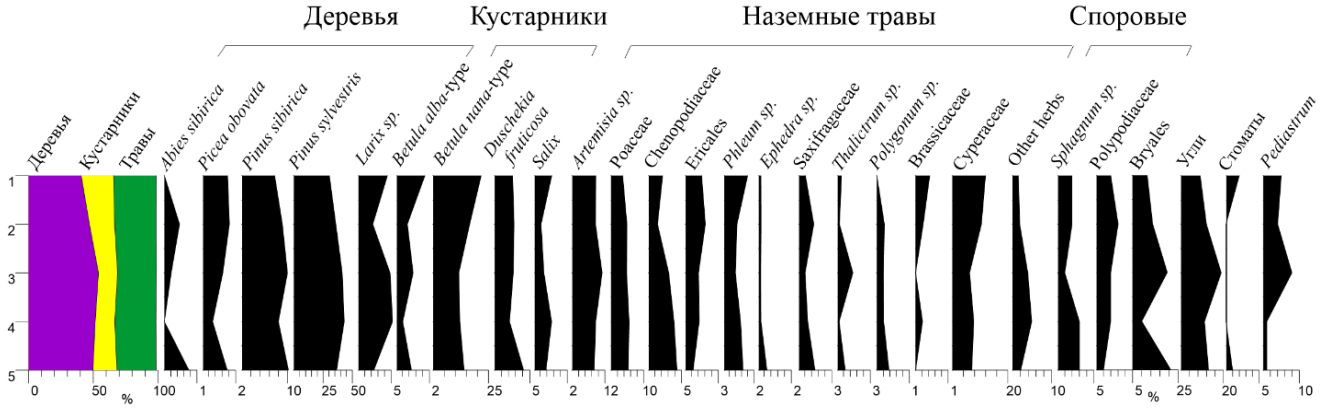

Рис. 2. Состав спорово-пыльцевых спектров из верхнего слоя ила у уреза воды в озере Ильчир
В группе общего состава СПС лиловым цветом выделена пыльца древесных растений, желтым – кустарников, зеленым – наземных трав. Относительное обилие спор не превышает 1,5 %, поэтому на диаграмме они почти не видны. Обилие микрочастиц углей, стомат, клеток водорослей *Pediastrum* Meyen приведены в абсолютном количестве на пыльцевом слайде

Fig. 2. Composition of spore-pollen spectra from the uppermost silt layer at the water edge in Lake Ilchir
In the general SPS composition section, lilac is the pollen of arboreal plants, yellow corresponds shrubs, green color means on-land herbs pollen. The relative abundance of spores does not exceed 1,5 %, so they are almost invisible on the diagram. The abundance of the charcoal microparticles, stomata, and *Pediastrum* Meyen algae cells are shown in absolute numbers met on the pollen slide

---

Процентное соотношение индивидуальных пыльцевых таксонов во всех СПС рассчитывалось от суммы всех пыльцевых зерен, исключая споры папоротников и мхов. Процентное содержание зерен споровых растений было определено от суммы всех подсчитанных в каждом образце зерен пыльцы и спор. Одновременно в этих же препаратах проводился и подсчет общего количества частиц угля. Подсчет микрочастиц углей полезен в любом случае, поскольку позволяет косвенно судить о возникновении или отсутствии пожарных явлений в исследуемом регионе/районе, независимо от размеров бассейна озера. При этом мы не рассчитывали частоту пожарных явлений, их интенсивность, близость к береговой линии озера, потому что не применяли специальную методику выделения микрочастиц углей, а считали их на пыльцевых слайдах. Такая практика является обычной в палеогеографических исследованиях для получения дополнительной информации [Conedera et al., 2009]. На пыльцевых слайдах нами были определены и устьица хвойных древесных растений, нахождение которых является полезным методом для реконструкции истории растительности [Macdonald, 2002]. Устьица или стоматы хвойных деревьев указывают на близость исходных деревьев, например, к линии озера и играют важную роль в изучении растительности и восстановлении миграций границ древесной растительности в горных районах [Pisaric et al., 2001]. В описании пыльцевых зон приводятся средние значения обилия господствующих таксонов пыльцы.

Программное обеспечение Tilia/Tilia-Graph/TGView [Grimm, 2011] использовалось для расчета процентного соотношения пыльцевых таксонов, построения диаграмм и выделения локальных пыльцевых зон. Поскольку на происхождение, распространение и захоронение непыльцевых палиноморф – НПП (микрочастицы углей, стоматы, водоросли) могут влиять совершенно разные наборы экологических переменных, то, согласно рекомендациям [Chevalier et al., 2020], мы не включали сумму НПП для расчета их относительного обилия, а показали их абсолютные значения на пыльцевых слайдах.

Хронологический контроль. Возраст отложений в керне определен методом радиоуглеродного датирования с применением ускорительной масс-спектрометрии (УМС ^{14}C) в Познаньской радиоуглеродной лаборатории (Польша) и в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН). Дату, полученную в ИЯФ СО РАН, следует рассматривать как экспериментальную, так как на данный момент лаборатория не сертифицирована. Однако значение даты логично встраивается между имеющимися датами из сертифицированной лаборатории. Всего получено пять дат, измеренные и калиброванные значения которых приведены в таблице. Измеренные значения ^{14}C возраста откалиброваны с использованием пакета программ OxCal v4.3 [Bronk Ramsey, 1995] и калибровочной кривой IntCal13 [Reimer et al., 2013]. Далее все значения возраста приводятся в калиброванном летоисчислении (лет назад до настоящего времени = л. н.).

УМС ^{14}C даты и их калиброванные значения для образцов из отложений керна из озера Ильчир

AMS ^{14}C dates and their calibrated values for samples from sedimentary core from Lake Ilchir

Лаб. номер	Глубина в керне, см	^{14}C значение	Калиброванное значение
Poz-106390	5–6	2 190 ± 30	2 219 ± 63
BINP_NSU_1420	27–28	3 134 ± 54	3 311 ± 90
Poz-106392	60–61	3 935 ± 35	4 415 ± 80
Poz-106393	91–92	4 740 ± 35	5 530 ± 74
Poz-106394	129–130	7 550 ± 40	8 373 ± 119
Расчетный возраст в модели	132	–	8 490

Пыльцевые индексы. Используя полученную палинологическую запись, мы рассчитали некоторые пыльцевые индексы, характеризующие изменение климата исследуемого района. Так, соотношение пыльцы темнохвойных и светлохвойных древесных растений, имеющих различные требования к эколого-эдафическим и климатическим факторам [Коропачинский, Встовская, 2002], может служить качественным показателем относительной изменчивости континентальности климата (относительного увлажнения и контрастности средних температур летнего и зимнего сезонов).

В группу пыльцы светлохвойных древесных включена пыльца *Pinus sylvestris* L. и *Larix sibirica* Ledeb., а в группу пыльцы темнохвойных древесных – пыльца *Pinus sibirica* Du Tour, *Abies sibirica* Ledeb., *Picea obovata* Ledeb. Отношение суммы пыльцы древесных растений (arboreal pollen, AP) к сумме пыльце кустарников и трав (Non Arboreal Pollen, NAP) характеризует относительную лесопокрытость территории. Индекс степь/лес (Steppe-Forest Index) отражает взаимоотношение между лесными и степными таксонами – индикаторами изменения уровня общего увлажнения [Traverse, 2007]. Повышенные значения SFI соотносятся с повышенной засушливостью/аридностью климата и наоборот. При построении графика «Изменение избранных палинологических индексов природной среды бассейна озера Ильчир» использованы значения соответствующих пыльцевых таксонов, подсчитанные при анализе (рис. 4). Нелинейные характеристики, полученные в результате подсчета пыльцы и спор в образцах, особенно пики на глубине 80 и 43 см в керне, были аппроксимированы с применением полинома третьей степени, чтобы сгладить вариации обилия пыльцы ветроопыляемых растений и упростить понимание изменения рассчитанных индексов.

Результаты

Хронология. Результаты датирования показали, что возраст отложений в основании керна из озера Ильчир составляет около 8 500 лет. Возраст верхнего слоя (5,5 см) оказался равным 2 190 лет.

Отражение локальной растительности котловины озера Ильчир в современных пыльцевых спектрах. Локальная растительность котловины озера представлена редкими островками лиственницы, зарослями кустарниковой березки. Наземный покров на северных склонах котловины сформирован вересковыми кустарничками, лишайниками и сфагновыми мхами. В прибрежной части озера преобладают осоки и злаки, а на склонах южной экспозиции – представители травянистых растений, принадлежащих к лугово-степным сообществам – рода полыни *Artemisia* L., семейства маревых Chenopodiaceae, лютиковых Ranunculaceae, гвоздичных Caryophyllaceae, сложноцветных Asteraceae, гречишных Polygonaceae, бобовых Fabaceae, камнеломковых Saxifragaceae.

Известно, что пыльца лиственницы слабо представлена в поверхностных (современных) пыльцевых спектрах [Brubaker et al., 2005; Lisitsyna et al., 2011; Klemm et al., 2013]. В современных СПС, взятых из илов у уреза воды в озере, среднее значение обилия пыльцы лиственницы составляет 4 % (см. рис. 2), формируя локальный компонент пыльцевого дождя. Это значение мы принимаем за пороговое, указывающее на ее произрастание в котловине озера Ильчир в виде островков или лент, как в настоящее время (рис. 4).

Пыльца пихты и ели также не разносится на значительные расстояния, и большая ее часть оседает у стены продуцирующих их древостоев [Liu et al., 1999; Bezrukova et al., 2005]. В составе современной растительности вокруг озера Ильчир пихта и ель не произрастают, а в современных СПС среднее значение пыльцы пихты составляет 0,3 %, а ели – 1,3 % (рис. 3). Следовательно, в современных СПС района исследования эти значения связаны с разреженной растительностью локального ландшафта и отражают региональный компонент пыльцевого дождя.

Известно, что поверхностные СПС открытых ландшафтов, таких как лесотундра, тундра, степь содержат пыльцевые зерна из внерегиональных источников [Seppä et al., 2004]. Особенно много в СПС из открытых ландшафтов пыльцы ветроопыляемых древесных растений, таких как сосна сибирская и обыкновенная и береза древовидная [Безрукова, 1999].

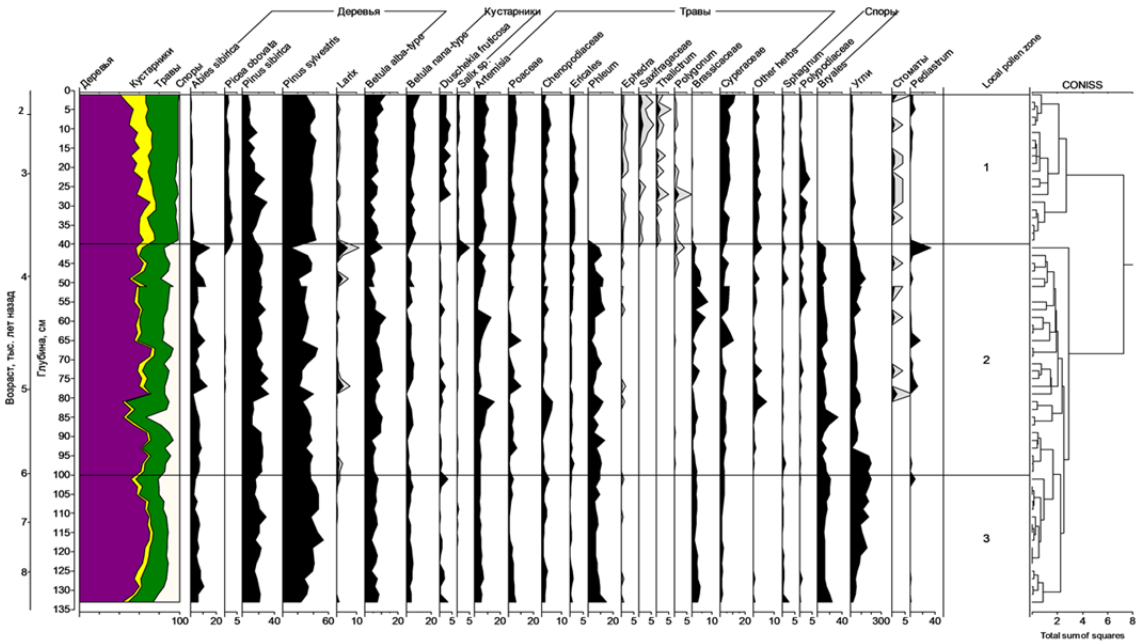

Рис. 3. Спорово-пыльцевая диаграмма донных отложений озера Ильчир

В шкале общего состава СПС лиловый цвет – пыльца древесных растений, желтый – кустарников, зеленый – наземных трав, белый – споры папоротникообразных, сфагновых и зеленых мхов

Fig. 3. Spore-pollen diagram of bottom sediments of Lake Ilchir

In the general SPS composition section, lilac is the pollen of arboreal plants, yellow corresponds shrubs, green color means on-land herbs pollen, white refers to spores of ferns, *sphagnum* and green mosses

Рис. 4. Вид котловины озера Ильчир с запада, фото авторов

Fig. 4. View of the Lake Ilchir basin from the west, photo by the authors

В котловине озера Ильчир в настоящее время этих древесных таксонов нет. В СПС из поверхностных образцов значения пыльцы этих древесных составляют 9,35 и 2 % соответственно (см. рис. 2). Следовательно, пыльца обеих сосен и березы также может быть отнесена к заносному компоненту СПС. Значения обилия в современных СПС пыльцы большей части кустарниковых и травянистых таксонов в общем верно отражает современное распространение этих растений в котловине озера Ильчир. Присутствие в поверхностных отложениях устьиц лиственницы характеризует ее присутствие вблизи береговой линии озера.

Палиностратиграфия. Результаты пыльцевого анализа донных отложений озера Ильчир суммирова-

ны на спорово-пыльцевой диаграмме (рис. 3). Описание локальных пыльцевых зон приведено ниже.

Самая нижняя зона 3 (132–98 см, ок. 8 490–6 000 л.н.) включает спорово-пыльцевые спектры с максимальным содержанием пыльцы группы древесных растений (68 %), в которой преобладает пыльца сосны обыкновенной (40 %). Довольно высоко обилие пыльцы тимофеевки *Phleum* sp. (8 %) из семейства злаковых Poaceae (3 %), а также микрочастиц углей (116 штук/слайд).

Зона 2 (98–40 см, ок. 6000–3700 л.н.) включает СПС, в которых, по сравнению с предыдущей зоной, снизилось относительное обилие пыльцы древесных (с 68 до 62 %), в основном, за счет пыльцы сосны обыкновенной (с 40 до 31 %). При этом повысилось содержание пыльцы пихты (с 5,5 до 7 %), сосны сибирской (с 19 до 23 %) и особенно лиственницы (с 0,1 до 0,7 %), а также устьиц ее хвои (с 0 до 2 штук/слайд). Количество микрочастиц угля снизилось (со 116 до 72 штук/слайд).

В СПС зоны 1 (верхние 40 см керна, последние примерно 3 700 лет) по сравнению с предыдущей зоной еще больше снижается содержание пыльцы древесных (с 62 до 56 %) и повышается – пыльцы кустарников (с 3,5 до 14 %) и травянистых растений (с 23 до 27 %). В группе древесных стало больше пыльцы сосны обыкновенной (с 31 до до 38 %), березки кустарниковой (с 3 до 6 %), ели (с 0,2 до 1,9 %). Продолжается снижение обилия микрочастиц угля (с 72 до 18 штук/слайд).

Обсуждение результатов и интерпретация пыльцевой записи

По мере уточнения знаний о геологических процессах, становится все более очевидным, что существуют значительные различия между последовательностью событий на разных континентах и даже между различными регионами внутри континентов, как и океанах. Для установления терминологии, необходимой для однозначной коммуникации, для понимания места регионального события в его мировой шкале и причин, его вызывавших, требуется связная и глобально применимая хроностратиграфическая структура, в том числе структура голоцена. Такая структура для голоцена была одобрена Международной комиссией по стратиграфии (ICS) и ратифицирована в 2018 г. исполнительным комитетом Международного союза геологических наук (IUGS), куда входит и Россия. Для соответствия международному уровню хроностратиграфических исследований и проведения соответствующих корреляций следует правильно размещать выявляемые региональные события в масштабах глобальных стратотипов и пытаться понять причины возникновения региональных событий.

Полученная нами первая детальная пыльцевая запись из озера Ильчир позволяет реконструировать историю растительности и природно-климатических условий водосборного бассейна озера за последние почти 8 500 лет. Согласно новому формальному подразделению голоценовой эпохи [Walker et al., 2019], последние 8 500 лет включают в себя финал гренландской эпохи (the Greenlandian), а также северо-гриппианскую (the Northgrippian) и мегалайскую (the Meghalayan) эпохи.

Для высокогорий Восточного Саяна (как и Алтая) сравнение региональных палеогеографических событий с глобальными стратотипами из Северо-Атлантического региона выглядит уместным, если учесть, что климат юга Сибири формируется под решающим воздействием генерального западного атмосферного переноса из Северо-Атлантического региона [Wassenburg et al., 2016]. Термины *гренландский*, *северо-гриппианский* и *мегалайский ярус/эпоха* были предложены для обозначения трех давно используемых международным сообществом подразделений, которые аналогичны ранней, средней и поздней эпохам соответственно.

Состав СПС, повышенные значения AP/NAP и пониженные – SFI свидетельствуют о значительном участии лесной растительности в бассейне озера Ильчир в финале гренландской эпохи и в первой половине северо-гриппианской эпохи, ок. 8 490–6 000 л. н., что видно на рис. 5.

Согласно нашей записи, для этого времени было характерно самое широкое развитие в лесном поясе Восточного Саяна кедровых лесов с участием пихты, лиственницы, сосны и березы. Широкое распространение сосен в горах, ниже озера Ильчир, ок. 8 490–6 000 л. н. хорошо согласуется с их распространением в это время в горах Восточного Саяна, Алтая [Blyakharchuk et al., 2007; Mackay et al., 2012; Bezrukova et al., 2016]. Повышенное содержание пыльцы сосны обыкновенной в СПС зоны 3 (40 %), сосны сибирской (в среднем 20 %), пихты (5,5 %) по сравнению с их содержанием в поверхностных СПС (35, 9 и 0,3 % соответственно) предполагает более высокое, чем сегодня, положение верхней границы леса и ее приближение к бассейну озера Ильчир. Повышенное обилие микрочастиц углей в эту эпоху может служить косвенным подтверждением более густого растительного покрова в котловине и (или) в бассейне озера и (или) активной эрозии в бассейне озера. Однако относительно низкая средняя скорость аккумуляции отложений (рис. 5) позволяет предполагать, что основной причиной поступления микрочастиц углей могли быть региональные пожарные явления. Плотный растительный покров мог продуцировать подходящую для горения биомассу. Локальная растительность была представлена разнотравно-злаковыми луговыми группировками (возможно, как и сегодня тимофеевкой луговой) с небольшими островками древесной растительности из лиственницы и, возможно, пихты, хотя отсутствие в отложениях их устьиц предполагает произрастание деревьев довольно далеко от берега озера.

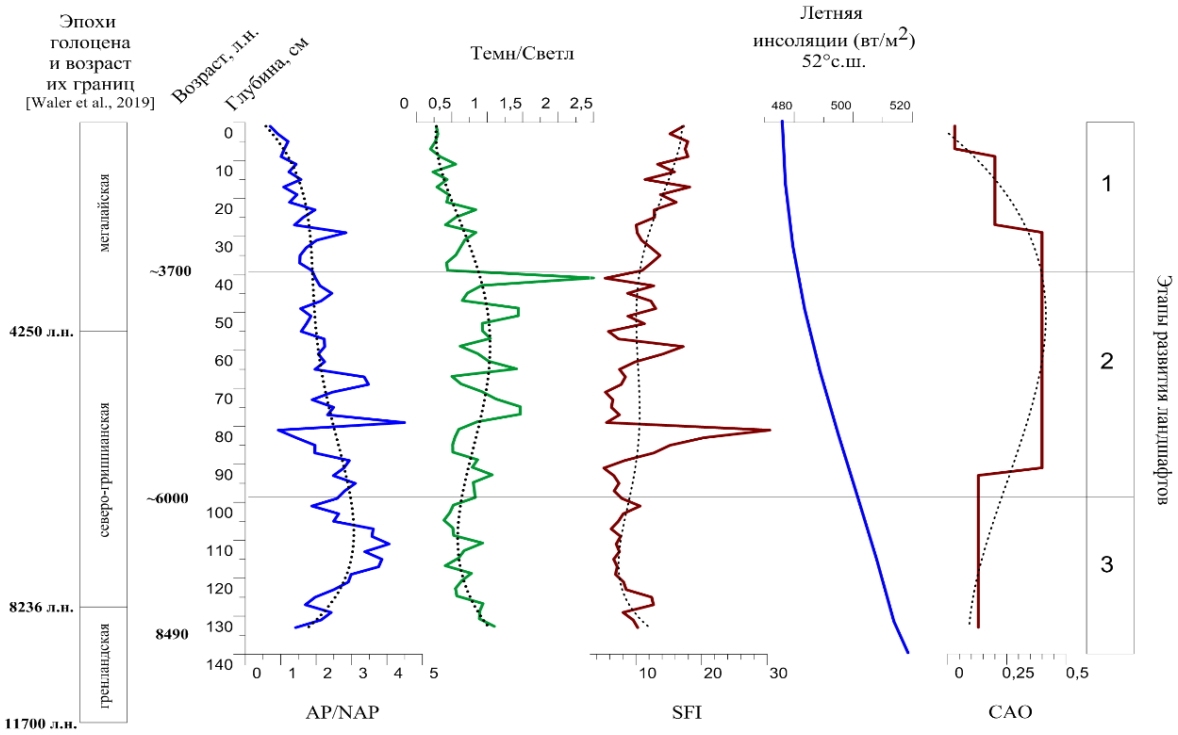

Рис. 5. Изменение избранных палинологических индексов природной среды бассейна озера Ильчир
Рассчитаны из представленной в статье пыльцевой записи в сравнении с поступлением летнего тепла на широту Восточного Саяна согласно [Berger, Loutre, 1991]. Пунктирные линии в шкалах AP/NAP, Темн/Светл и SFI – полиноминальная аппроксимация данных (полином 5-й степени). CAO – средняя скорость аккумуляции отложений между датированными уровнями, см/год

Fig. 5. Changes in the selected palynological indices of the natural environment of the Lake Ilchir catchment
Calculated on the pollen record presented in the article in comparison with the summer insolation values to the latitude of the Eastern Sayan, according to [Berger, Loutre, 1991]. Dashed lines in AP/NAP, Dark/Light and SFI scales – polynomial approximation of the data (5th degree polynom). CAO – average sediment accumulation rate (SAR) between the AMS14C dated levels, cm/year

Вероятно, в котловине климат был умеренно-холодный с недостаточным увлажнением. Скорее всего, значительно более высокий, чем современный, уровень летней инсоляции (см. рис. 5) приводил к высокому испарению с поверхности почв в котловине озера, затрудняя распространение в ней древесных.

Ранний период развития природной среды бассейна озера Ильчир ок. 8 490–6 000 л. н. совпадает с максимальным за последние 8 500 лет поступлением летней инсоляции на широту Восточного Саяна (рис. 5) и активным западным переносом атмосферной влаги с Атлантического океана [Zhang et al., 2020], что могло приводить к глубокому протаиванию многолетней мерзлоты в горах, поддерживая почвенное увлажнение, благоприятное для лесной растительности.

Во второй половине северо-гриппианской и первой половине мегалайской эпохи (рис. 5), 6 050–3 700 л. н., климат бассейна озера Ильчир характеризовался более теплыми, чем современные, зимними сезонами и высоким снежным покровом, который не позволял промерзать почвам и поддерживал развитие пихты. Однако обилие пыльцы лиственницы и клеток устьиц ее хвои в отложениях этого времени (см. рис. 3) предполагает постепенное усиление роли лиственницы в составе локальной растительности склонов котловины озера и (или) ее приближение к береговой линии озера. Лиственница известна как древесная порода, которая хорошо приспособлена к существованию в холодном и недостаточно влажном климате [Щербаков, 1962]. Расширение площадей лиственницы в бассейне озера Ильчир ок. 6 000–3 700 л. н. может означать, что климатические условия этого времени стали более благоприятными для повышения конкурентной способности лиственницы, т.е. климат постепенно становился резко континентальным, более холодным. Похолодание, обусловленное снижением уровня летней инсоляции, вероятно, привело к формированию близко залегающего к поверхности слоя многолетнемерзлых пород, что очень неблагоприятно для пихты [Епова, 1960]. Пыльцевые индексы также свидетельствуют о развитии более изреженной, чем в предыдущий этап, древесной растительности.

Постоянное присутствие вокруг озера злаковых ассоциаций, большая часть пыльцы которых морфологически идентична пыльце рода *Phleum* L. [Moore et al., 1991], подтверждает вывод о довольно высоком почвенном увлажнении в прибрежной зоне озера Ильчир.

Состав СПС, формировавшихся в мегалайскую эпоху голоцена, в последние примерно 3 700 лет (см. рис. 3), предполагает продолжающееся повышение континентальности климата, снижение среднегодовой суммы атмосферных осадков, особенно в виде снега, который ранее предотвращал глубокое промерзание почв. Такие условия привели к почти полному исчезновению пихты в бассейне озера Ильчир и расширению площадей ели, а также тундровых группировок из кустарниковой березки и заболоченных осоковых и сфагновых группировок, хорошо приспособленных к существованию на близко залегающих многолетнемерзлых породах [Bezrukova et al., 2003, 2005]. Таяние многолетней мерзлоты обеспечивало высокое почвенное увлажнение летом, что позволяло ели существовать в долинах водотоков бассейна озера Ильчир. Однако отсутствие устьиц ели и постоянное присутствие устьиц хвои лиственницы дают основание предположить, что в самой котловине озера ель не росла.

Палинологические индексы свидетельствуют о постепенном сокращении лесной растительности параллельно снижению летней инсоляции, расширении степной растительности, причем этот локальный тренд соответствует ранее реконструированному расширению степной растительности на южных склонах котловины озера ESM-1, расположенного в нескольких км выше озера Ильчир [Mackay et al., 2012].

Взаимоотношения реконструированных растительных сообществ с пожарами. Многочисленные исследования показывают, что состав локальной/региональной растительности в значительной степени может быть взаимосвязан не только с климатом, но и с режимом пожаров на протяжении всего голоцена [Molinari et al., 2020]. В полученной нами записи микрочастиц углей представлены таковые размерностью менее 120 мкм, прошедшие через сито, применяемое в процессе подготовки образцов. Как правило, предполагается, что микрочастицы угля длиной примерно 10–200 мм могут переноситься ветром на большие расстояния от места осаждения и, следовательно, в основном отражают историю региональных пожаров [Blackford, 2000]. В донных отложениях озера Ильчир (рис. 3) их самое высокое обилие характерно для периода ок. 8 490–6 000 л. н. В это же время реконструировано самое высокое положение границы сосны относительно бассейна озера Ильчир и локальное присутствие пихты, трав. Вероятно, эти растения обеспечивали биомассу для природных пожаров в самые теплые месяцы летних сезонов.

В интервал времени ок. 6 000–3 700 л. н. среднее значение встречаемости микрочастиц углей на слайде снизилось со 116 фрагментов до 72. Несмотря на возросшие значения скорости аккумуляции отложений, снижение обилия микрочастиц углей могло означать сокращение доступной для огня растительной биомассы и (или) повышение влажности почв. Такое предположение согласуется с реконструированным похолоданием, активизацией многолетней мерзлоты, снижением верхней границы обеих сосен в бассейне озера Ильчир во второй половине северо-гриппианской эпохи.

Самое низкое количество микрочастиц углей характерно для последних 3 700 лет, для которых реконструировано похолодание, снижение среднегодовой суммы атмосферных осадков, верхней границы леса в регионе, развитие многолетней мерзлоты – источника высокого почвенного увлажнения, сдерживающего низовые пожары. Такой вывод поддерживается исследованиями, показывающими, что опасность пожаров, вызванных климатическими условиями, реже встречается в менее продуктивных экосистемах [Pausas, Ribeiro, 2013]. В нашем случае, вероятно, снижение биомассы растений привело к развитию менее продуктивных экосистем в бассейне озера Ильчир позднее 3 700 л. н., что в сочетании с влажными и холодным почвами могло привести к снижению частоты и интенсивности пожаров.

В целом отсутствие резких изменений в составе реконструированной растительности позволяет предполагать, что в бассейне и котловине озера Ильчир природные пожары не оказывали решающего влияния на смену состава растительности.

Заключение

Новая палинологическая запись из донных отложений озера Ильчир дает представление о палеоэкологической истории его котловины и бассейна, начиная с 8 490 л. н. Реконструкции растительности и климата за это время показывают, что климат финала гренландской и первой половины северо-гриппианской эпохи был относительно теплым и обеспечивал самое широкое развитие лесной растительности в горах Восточного Саяна. Однако в самой котловине озера преобладала травяно-кустарниковая растительность. Позднее, во второй половине северо-гриппианской и первой половине мегалайской эпохи, постепенное похолодание климата привело к отступлению верхней границы леса от озера, замещению в локальных древостоях пихты на лиственницу. Дальнейшая континентализация климата на протяжении большей части мегалайской эпохи в котловине и бассейне озера привела к исчезновению пихты, расширению площадей луговостепной и болотной растительности в котловине на склонах разной экспозиции. Появление ели, вероятно, в долинах рек и ручьев в бассейне озера, также индицирует более холодный, чем ранее, климат. Степная растительность стала занимать хорошо прогреваемые летом склоны южной экспозиции.

Сравнение полученной нами новой записи растительности и климата из высокогорной части Восточ-

ного Саяна за последние 8 490 лет с поступлением в исследуемый регион летней инсоляции в этот же период времени показывает, что динамика верхней границы леса в горах Восточного Саяна зависит от климата и контролируется, прежде всего, температурой воздуха.

Первые результаты палеоэкологического изучения донных отложений озера Ильчир показали их высокий потенциал для дальнейшей работы с донными отложениями озер этого региона. Планируемое еще более детальное временное разрешение подобных записей улучшит наше понимание взаимодействия гидрологического режима озер с климатом и предоставит ценнейшую научную информацию для рационального использования водных ресурсов.

Исследования поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 19-05-00328, 20-05-00247), Интеграционным проектом СО РАН (№ 0341-2017-0001) и выполнены в соответствии с государственным заданием Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (проект № 0284-2021-0003).

ЛИТЕРАТУРА

Епова Н.А. Опыт дробного геоботанического районирования Хамар-Дабана (южная часть Средней Сибири) // Проблемы ботаники / В.Н. Сукачев. М.; Л. : Изд-во АН СССР, 1960. С. 47–62.

Безрукова Е.В. Палеогеография Прибайкалья в позднеледниковье и голоцене. Новосибирск : Наука, 1999. 128 с.

Бобров А.Е., Куприянова Л.А., Литвинцева М.В., Тарасевич В.Ф. Споры папоротникообразных и пыльца голосеменных и однодольных растений флоры Европейской части СССР. Л.: Наука, 1983. 208 с.

Коропачинский И.Ю., Встовская Т.Н. Древесные растения Азиатской России. Новосибирск : Гео, 2002. 705 с.

Куприянова Л.А., Алешина Л.А. Пыльца двудольных растений флоры Европейской части СССР. Л. : Наука, 1978. 184 с.

Холбоева С.А. Структура растительного покрова Окинского плоскогорья (Восточный Саян) // Ученые записки ЗабГГПУ, 2011. № 1 (36). С. 214–216.

Щербаков И.П. Лесные ресурсы Якутии и их использование. Якутск : Кн. изд-во, 1962. 36 с.

Berger A.B., Loutre M.F. Insolation values for the climate of the last 10 million years // Quaternary Science Reviews. 1991. V. 10. P. 297–317.

Berglund B.E., Ralska-Jasiewiczowa M. Pollen analysis and pollen diagrams // Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology. New York, 1986. P. 455–484.

Bezrukova E.V., Abzaeva A.A., Letunova P.P., Kulagina N.V., Vershinin K.E., Belov A.V., Orplova L.A., Danko L.V. Postglacial history of Siberian spruce (*Picea obovata*) in the Lake Baikal area and the significance of this species as paleo-environmental indicator // Quaternary International. 2005. V. 136. P. 18–32.

Bezrukova E.V., Shchetnikov A.A., Kuzmin M.I., Sharova O.G., Kulagina N.V., Letunova P.P., Ivanov E.V., Kraynov M.A., Kerber E.V., Filinov I.A., Levina O.V. First data on the environment and climate change within the Zhom-Bolok volcanic field (Eastern Sayan Mountains) in the Middle–Late Holocene // Reports Earth Sciences. 2016. V. 468. P. 527–531.

Bezrukova E.V., Vershinin K.E., Orlova L.A., Letunova P.P., Krapivina S.M., Chepinoga V.V., Verkhozina A.V., Dudareva N.V., Abzaeva A.A. Late Holocene vegetation and climate in the East Sayan Mountains // Russian Geology and Geophysics. 2003. V. 44 (4). P. 380–384.

Blackford J.J. Charcoal fragments in surface samples following a fire and the implications for interpretation of subfossil charcoal data // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2000. V. 164 (1–4). P. 33–42.

Blyakharchuk T.A., Wright H.E., Borodavko P.S., Van der Knaap W.O., Ammann. B. Late Glacial and Holocene vegetational history of the Altai Mountains (southwestern Tuva Republic) // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2007. V. 245. P. 518–534.

Bondarenko N.A., Sheveleva N.G., Domysheva V.M. Structure of plankton communities in Ilchir, an alpine lake in Eastern Siberia // Limnology. 2002. V. 3. P. 127–133.

Bronk Ramsey C. Radiocarbon calibration and analysis of stratigraphy: the OxCal program // Radiocarbon. 1995. V. 37 (2). P. 425–430.

Brubaker L.B., Anderson P.M., Edwards M.E., Lozhkin A.V. Beringia as a glacial refugium for boreal trees and shrubs: new perspectives from mapped pollen data // Journal of Biogeography. 2005. V. 32. P. 833–848.

Chevalier M., Davis B.A.S., Heiri O., Seppä H., Chase B.M., Gajewski K., Lacourse T., Telford R.G., Finsinger W., Guiot J., Kühl N., Maezumi S.Y., Tipton J.R., Carter V.A., Brussel T., Phelps L.N., Dawson A., Zanon M., Vallé F., Nolan C., Mauri A., de Vernal A., Izumi K., Holmström L., Marsiceka J., Goring S., Sommer Ph.S., Chapute M., Kupriyanov D. Pollen-based climate reconstruction techniques for late Quaternary studies // Earth-Science Reviews. 2020. V. 210. P. 103–384.

Conedera M., Tinner W., Neff Ch., Meurer M., Dickens A.F., Krebs P. Reconstructing past fire regimes: methods, applications, and relevance to fire management and conservation // Quaternary Science Reviews. 2009. V. 28. P. 555–576.

Grimm E.C. Tilia 1.7.16 Software. Springfield, IL: Illinois State Museum. Research and Collection Center, 2011. URL: http://intra.museum.state.il.us/pub/grimm/tilia/

Klemm J., Herzschuh U., Pisaric M.F.J., Telford R.J., Heim B., Pestryakova L.A. A pollen-climate transfer function from the tundra and taiga vegetation in Arctic Siberia and its applicability to a Holocene record // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2013. V. 386. P. 702–713.

Lisitsyna O.V., Giesecke T., Hicks S. Exploring pollen percentage threshold values as an indication for the regional presence of major European trees // Review of Palaeobotany and Palynology. 2011. V. 166. P. 311–324.

Liu H.Y., Cui H.T., Pott R., Speier M. The surface pollen of the woodland-steppe ecotone in southeastern Inner Mongolia, China // Review of Palaeobotany and Palynology. 1999. V. 105. P. 237–250.

Macdonald G.M. Conifer Stomata // Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Developments in Paleoenvironmental Research / J.P. Smol, H.J.B. Birks, W.M. Last, R.S. Bradley, K. Alverson. 2002. Springer, Dordrecht. V. 3. doi: 10.1007/0-306-47668-1_3.

Mackay A.W., Bezrukova E.V., Leng M.J., Meaney M., Nunes A., Piotrowska N., Self A., Shchetnikov A., Shilland E., Tarasov P., Luo Wang, White D. Aquatic ecosystem responses to Holocene climate change and biome development in boreal, central Asia // Quaternary Science Reviews. 2012. V. 41. P. 119–131.

Molinari Ch., Carcaillet Ch., Bradshaw R.H.W., Hannon G.E., Lehsten V. Fire-vegetation interactions during the last 11,000 years in boreal and cold temperate forests of Fennoscandia // Quaternary Science Reviews. 2020. V. 241. P. 106–408.

Moore P.D., Webb J.A., Collinson M.E. Pollen analysis. Second edition. Blackwell Scientific Publications. 1991. 216 p.

New M., Lister D., Hulme M., Makin I. A high-resolution data set of surface climate over global land areas // Climate Research. 2002. V. 21. P. 1–25.

Pausas J.G., Ribeiro E. The global fire productivity relationship // Global Ecol. Biogeogr. 2013. V. 22. P. 728–736.

Pisaric M.F.J., MacDonald G.M., Cwynar L.C., Velichko A.A. Modern pollen and conifer stomates from north-central Siberian lake sediments: their use in interpreting late Quaternary fossil pollen assemblages // Arctic, Antarctic and Alpine Research. 2001. V. 34. P. 19–27.

Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Ramsey C.B., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Haflidason H., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Staff R.A., Turney C.S.M., Van der Plicht J. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP // Radiocarbon. 2013. V. 55. P. 1869–1887.

Seppä H., Birks H.J.B., Odland A. et al. A modern pollen–climate calibration set from northern Europe: Developing and testing a tool for palaeoclimatological reconstructions // Journal of Biogeography. 2004. V. 31. P. 251–267.

Traverse A. Paleopalynology. Dordrecht: Springer. 2007. 813 p. ISBN 9781402056093

Walker M., Gibbard Ph., Head M.J., Berkelhammer M., Björck S., Cheng H., Cwynar L.C., Fisher D., Gkinis V., Long A., Lowe J., Newnham R., Rasmussen S.O., Weiss H. Formal Subdivision of the Holocene Series/Epoch: A Summary // Journal Geological Society of India. 2019. V. 93. P. 135–141.

Wassenburg J.A., Dietrich S., Fietzke J., Fohlmeister J., Jochum K.P., Scholz D., Richter D.K., Sabaoui A., Spötl Ch., Lohmann G., Andreae M.O., Immenhauser A. Reorganization of the North Atlantic Oscillation during early Holocene deglaciation // Nature Geosciences. 2016. V. 9. P. 602–606.

Zhang D., Chen X., Li Ya., Wang W., Sun A., Yang Yu., Ran M., Feng Zh. Response of vegetation to Holocene evolution of westerlies in the Asian Central Arid Zone // Quaternary Science Reviews. 2020. V. 229. P. 106–138.

Авторы:
Волчатова Екатерина Валерьевна, аспирант, инженер-исследователь, лаборатория 24, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.
E-mail: volchatova@igc.irk.ru
Безрукова Елена Вячеславовна, доктор географических наук, главный научный сотрудник, лаборатория 24, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия; Иркутский научный центр СО РАН, Иркутск, Россия.
E-mail: bezrukova@igc.irk.ru
Кулагина Наталья Валентиновна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия; Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.
E-mail: kulagina@crust.irk.ru
Кербер Евгений Викторович, ведущий инженер, лаборатория 24, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.
E-mail: dr.kerber@yandex.ru
Решетова Светлана Александровна, кандидат географических наук, научный сотрудник, лаборатория 24, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.
E-mail: sresch@mail.ru
Щетников Александр Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия; Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.
E-mail: shch@crust.irk.ru
Филинов Иван Анатольевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия.
E-mail: filinov@crust.irk.ru

Geosphere Research, 2021, 1, 49–60. DOI: 10.17223/25421379/18/4

E.V. Volchatova[1], E.V. Bezrukova[1, 2, 3], N.V. Kulagina[2, 3], E.V. Kerber[1], S.A. Reshetova[1], A.A. Shchetnikov[1, 2], I.A. Filinov[2]

[1]Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Russia, Irkutsk
[2]Institute of the Earth's Crust SB RAS, Russia, Irkutsk
[3]Irkutsk Scientific Center, SB RAS, Russia, Irkutsk

VEGETATION HISTORY IN THE LAKE ILCHIR BASIN (EAST SAYAN MOUNTAINS) FOR THE LAST 8500 YEARS

Holocene climate is more complex both temporally and spatially than is commonly recognized. Pollen records from inland regions are important for understanding past changes in landscapes, assessing the sensitivity of ecosystems to future climatic variations that affect the composition of vegetation and its change over time. High-mountain boreal ecosystems are very vulnerable to climate change, and even minor fluctuations in it can lead to serious natural changes. We carried out analysis of pollen, spores, micro-charcoal particles, conifer stomata, and lithology of an AMS ^{14}C-dated core from high-mountain Lake Ilchir situated in the Eastern Sayan mountains, in order to reveal changes in vegetation and climate since 8490 cal yr BP. The sediments of 133 cm long core consists of gray silty clay and shows no signs of sedimentary hiatuses. Fife bulk sediment samples were dated with an accelerator mass spectrometry (AMS) system.

The modern vegetation of the Lake Ilchir basin is ranges from moist forb-grass meadow around the lake to small patches of open larch stands and shrubby birch on the basin slopes.

The pollen record presented here is the first continuous and well-dated records from Lake Ilchir covering the last 8490 cal years, allowing detailed reconstruction of vegetation and environmental dynamics in the region.

The results of the pollen analysis and pollen-based vegetation and climate reconstruction suggest that grass-dominated meadow communities prevailed in the lake basin from 8490 to 6000 kyr BP. The absence of larch and fir stomata in the sediments suggests the growth of trees rather far from the Lake shore. Probably, the climate in the basin was moderately cold with insufficient moisture. The high Scots pine pollen percentage in comparison with surface pollen spectra suggests a higher than today position of the upper boundary of the pine in response of higher-than-present summer insolation.

Between 6000–3700 kyr BP the climate was characterized by warmer than modern winter seasons and high snow cover, which did not allow the soils to freeze and supported the development of fir in the Ilchir Lake basin. However, the increased abundance of larch pollen and stomatal cells of its needles in sediments suggest an increased role of larch in the composition of local vegetation and / or its approach to the lake shoreline. Expansion of the areas of larch means that climate gradually became sharply continental, more arid.

The last 3700 years was characterized by a continuing increase in climate continentality and cooling that led to the complete disappearance of fir and appearance of spruce in the lake catchment.

The more detailed temporal resolution of future palaeoecological records from this region will improve our understanding of the interaction of the lakes hydrology with climate and will provide valuable information for the efficient use of water resources.

Keywords**:** *spore-pollen analysis, vegetation, climate, Holocene.*

References

Epova N.A. *Opyt drobnogo geobotanicheskogo rayonirovaniya Khamar-Dabana (yuzhnaya chast' Sredney Sibiri)* [Geobotanical zoning of Khamar-Daban (southern part of Central Siberia)] // Problemy botaniki / V.N. Sukacheva. Izd-vo AN SSSR, Moscow-Leningrad, 1960. pp. 47–62. In Russian

Bezrukova E.V. *Paleogeografiya Pribaykal'ya v pozdnelednikov'e i golotsene* [Paleogeography of the Baikal region in the Late Ice Age and Holocene]. Novosbirsk: Nauka, 1999. 128 p. In Russian

Bobrov A.E., Kupriyanova L.A., Litvintseva M.V., Tarasevich V.F. *Spory paporotnikoobraznykh i pyl'tsa golosemennykh i odnodol'nykh rasteniy flory Evropeyskoy chasti SSSR* [Fern spores and pollen of gymnosperms and monocotyledons of flora of the European part of the USSR] / L.A. Kupriyanova. Leningrad: Nauka, 1983. 208 p. In Russian

Koropachinskiy I.Yu., Vstovskaya T.N. *Drevesnye rasteniya Aziatskoy Rossii* [Woody plants of Asian Russia]. Novosibirsk: Geo, 2002. 705 p. In Russian

Kupriyanova L.A., Aleshina L.A. *Pyl'tsa dvudol'nykh rasteniy flory Evropeyskoy chasti SSSR* [Pollen of dicotyledonous plants of the flora of the European part of the USSR] / L.A. Kupriyanova. Leningrad: Nauka, 1978. 184 p. In Russian

Kholboeva C.A. *Struktura rastitel'nogo pokrova Okinskogo ploskogor'ya (Vostochnyy Sayan)* [The structure of the vegetation cover of the Okinsky plateau (Eastern Sayan)] // Uchenye zapiski ZabGGPU. 2011. No 1 (36). pp. 214–216. In Russian

Shcherbakov I.P. Lesnye resursy Yakutii i ikh ispol'zovanie [Forest resources of Yakutia and their use.?]. Yakutsk: Kn. izd-vo, 1962. 36 p.

Berger A.B., Loutre M.F. Insolation values for the climate of the last 10 million years // Quaternary Science Reviews. 1991. V. 10. pp. 297–317.

Berglund B.E., Ralska-Jasiewiczowa M. Pollen analysis and pollen diagrams // Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology / B.E. Berglund. Interscience. New-York, 1986. pp. 455–484.

Bezrukova E.V., Abzaeva A.A., Letunova P.P., Kulagina N.V., Vershinin K.E., Belov A.V., Orplova L.A., Danko L.V. Post-glacial history of Siberian spruce (Picea obovata) in the Lake Baikal area and the significance of this species as paleo-environmental indicator // Quaternary International. 2005. V. 136. pp. 18–32.

Bezrukova E.V., Shchetnikov A.A., Kuzmin M.I., Sharova O.G., Kulagina N.V., Letunova P.P., Ivanov E.V., Kraynov M.A., Kerber E.V., Filinov, I.A. Levina O.V. First data on the environment and climate change within the Zhom-Bolok volcanic field (Eastern Sayan Mountains) in the Middle–Late Holocene // Reports Earth Sciences. 2016. V. 468. pp. 527–531.

Bezrukova E.V., Vershinin K.E., Orlova L.A., Letunova P.P., Krapivina S.M., Chepinoga V.V., Verkhozina A.V., Dudareva N.V., Abzaeva A.A. Late Holocene vegetation and climate in the East Sayan Mountains // Russian Geology and Geophysics. 2003. V. 44(4). pp. 380–384.

Blackford J.J. Charcoal fragments in surface samples following a fire and the implications for interpretation of subfossil charcoal data // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2000. V. 164. pp. 33–42.

Blyakharchuk T.A., Wright H.E., Borodavko P.S., Van der Knaap W.O., Ammann. B. Late Glacial and Holocene vegetational history of the Altai Mountains (southwestern Tuva Republic) // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2007. V. 245. pp. 518–534.

Bondarenko N.A., Sheveleva N.G., Domysheva V.M. Structure of plankton communities in Ilchir, an alpine lake in eastern Siberia // Limnology. 2002. V. 3. pp. 127–133.

Bronk Ramsey C. Radiocarbon calibration and analysis of stratigraphy: the OxCal program // Radiocarbon. 1995. V. 37. pp. 425–430.

Brubaker L.B., Anderson P.M., Edwards M.E., Lozhkin A.V. Beringia as a glacial refugium for boreal trees and shrubs: new perspectives from mapped pollen data // Journal of Biogeography. 2005. V. 32. pp. 833–848.

Chevalier M., Davis B.A.S., Heiri O., Seppä H., Chase B.M., Gajewski K., Lacourse T., Telford R.G., Finsinger W., Guiot J., Kühl N., Maezumi S.Y., Tipton J.R., Carter V.A., Brussel T., Phelps L.N., Dawson A., Zanon M., Vallé F., Nolan C., Mauri A., de Vernal A., Izumi K., Holmström L., Marsiceka J., Goring S., Sommer Ph.S., Chapute M., Kupriyanov D. Pollen-based climate reconstruction techniques for late Quaternary studies // Earth-Science Reviews. 2020. V. 210. pp. 103–384.

Conedera M., Tinner W., Neff Ch., Meurer M., Dickens A.F., Krebs P. Reconstructing past fire regimes: methods, applications, and relevance to fire management and conservation // Quaternary Science Reviews. 2009. V. 28. pp. 555–576.

Grimm E.C. Tilia 1.7.16 Software. Springfield, IL: Illinois State Museum. Research and Collection Center, 2011. Available: http://intra.museum.state.il.us/pub/grimm/tilia/

Klemm J., Herzschuh U., Pisaric M.F.J., Telford R.J., Heim B., Pestryakova L.A. A pollen-climate transfer function from the tundra and taiga vegetation in Arctic Siberia and its applicability to a Holocene record // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2013. V. 386. pp. 702–713.

Lisitsyna O.V., Giesecke T., Hicks S. Exploring pollen percentage threshold values as an indication for the regional presence of major European trees // Review of Palaeobotany and Palynology. 2011. V. 166. pp. 311–324.

Liu H.Y., Cui H.T., Pott R., Speier M. The surface pollen of the woodland-steppe ecotone in southeastern Inner Mongolia, China // Review of Palaeobotany and Palynology. 1999. V. 105. pp. 237–250.

Macdonald G.M. Conifer Stomata. In: Smol J.P., Birks H.J.B., Last W.M., Bradley R.S., Alverson K. (eds) Tracking Environmental Change Using Lake Sediments // Developments in Paleoenvironmental Research. Springer, Dordrecht, 2002. V. 3. https://doi.org/10.1007/0-306-47668-1_3.

Mackay A.W., Bezrukova E.V., Leng M.J., Meaney M., Nunes A., Piotrowska N., Self A., Shchetnikov A., Shilland E., Tarasov P., Luo Wang, White D. Aquatic ecosystem responses to Holocene climate change and biome development in boreal, central Asia // Quaternary Science Reviews. 2012. V. 41. pp. 119–131.

Molinari Ch., Carcaillet Ch., Bradshaw R.H.W., Hannon G.E., Lehsten V. Fire-vegetation interactions during the last 11,000 years in boreal and cold temperate forests of Fennoscandia // Quaternary Science Reviews. 2020. V. 241. pp. 106–408.

Moore P.D., Webb J.A., Collinson M.E. Pollen analysis. Second edition. Blackwell Scientific Publications, 1991. 216 p.

New M., Lister D., Hulme M., Makin I. A high-resolution data set of surface climate over global land areas // Climate Research. 2002. V. 21. pp. 1–25.

Pausas J.G., Ribeiro E. The global fire productivity relationship // Global Ecol. Biogeogr. 2013. V. 22. pp. 728–736.

Pisaric M.F.J., MacDonald G.M., Cwynar L.C., Velichko A.A. Modern pollen and conifer stomates from north-central Siberian lake sediments: their use in interpreting late Quaternary fossil pollen assemblages // Arctic, Antarctic and Alpine Research. 2001. V. 34. pp. 19–27.

Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Ramsey C.B., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Haflidason H., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Staff R.A, Turney C.S.M., Van der Plicht J. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP // Radiocarbon. 2013. V. 55. pp. 1869–1887.

Seppä H, Birks HJB, Odland A et al. A modern pollen–climate calibration set from northern Europe: Developing and testing a tool for palaeoclimatological reconstructions // Journal of Biogeography. 2004. V. 31. pp. 251–267.

Traverse A. Paleopalynology. Dordrecht: Springer, 2007. 813 p. ISBN 9781402056093.

Walker M., Gibbard Ph., Head M.J., Berkelhammer M., Björck S., Cheng H., Cwynar L.C., Fisher D., Gkinis V., Long A., Lowe J., Newnham R., Rasmussen S.O., Weiss H. Formal Subdivision of the Holocene Series/Epoch: A Summary // Journal Geological Society Of India. 2019. V. 93. pp. 135–141.

Wassenburg J.A., Dietrich S., Fietzke J., Fohlmeister J., Jochum K.P., Scholz D., Richter D.K., Sabaoui A., Spötl Ch., Lohmann G., Andreae M.O., Immenhauser A. Reorganization of the North Atlantic Oscillation during early Holocene deglaciation // Nature geosciences. 2016. V. 9. pp. 602–606.

Zhang D., Chen X., Li Ya., Wang W., Sun A., Yang Yu., Ran M., Feng Zh. Response of vegetation to Holocene evolution of westerlies in the Asian Central Arid Zone // Quaternary Science Reviews. 2020. V. 229. pp. 106–138.

Author's:

Volchatova Ekaterina V., postgraduate student, Research Engineer, Laboratory 24, Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia.
E-mail: volchatova@igc.irk.ru

Bezrukova Elena V., Dr. Sci. (Geography), Chief Researcher, Laboratory 24, Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia; Irkutsk scientific center, SB RAS, Irkutsk, Russia.
E-mail: bezrukova@igc.irk.ru

Kulagina Natalya V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia; Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia.
E-mail: kulagina@crust.irk.ru

Kerber Evgeny V., Leading Engineer, Laboratory 24, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia.
E-mail: dr.kerber@yandex.ru

Reshetova Svetlana A., Cand. Sci. (Geography), Researcher, Laboratory 24, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia.
E-mail: srescht@mail.ru

Shchetnikov Alexander A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia; Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia.
E-mail: shch@crust.irk.ru

Filinov Ivan A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia.
E-mail: filinov@crust.irk.ru