

ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 551.89(571.63)

ВЛИЯНИЕ ПОЗДНЕГОЛОЦЕНОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ СИХОТЭ-АЛИНСКОГО БИОСФЕРНОГО ЗАПОВЕДНИКА ПО ДАННЫМ СПОРОВО-ПЫЛЬЦЕВОГО АНАЛИЗА ОЗЕРНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

М.С. Лящевская¹, А.М. Паничев²^{1,2} Тихоокеанский институт географии ДВО РАН¹ Лаборатория палеогеографии и геоморфологии, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: lyshevskay@mail.ru² Лаборатория экологии и охраны животных, вед. науч. сотр., д-р биол. наук; e-mail: sikhote@mail.ru

Исследованы взаимосвязи между изменением климата в позднем голоцене и развитием кедровых лесов на территории Сихотэ-Алинского биосферного заповедника в зоне среднегогорья. Около 2640 календарных лет назад (кал. л. н.) в условиях умеренно теплого климата на месте современного кедрового леса развивались кедрово-дубовые формации с участием ели аянской (*Picea ajanensis*) и пихты белокорой (*Abies nephrolepis*), а также широколиственных пород, берез, ольхи и с примесью лиственницы. При наступлении наиболее теплых условий около 2280 кал. л. н. произошло максимальное обводнение оз. Нижнего, увеличение его площади и активное развитие водной и прибрежно-водной растительности. Повышение среднегодовых и среднелетних температур способствовало снижению в ценозах позиций доминанта – кедра корейского (*Pinus koraiensis*) и усилению роли дуба монгольского (*Quercus mongolica*). Ухудшение климатических условий около 2050 кал. л. н. привело к смене хвойно-широколиственного леса формацией кедровников, которая на территории Сихотэ-Алинского заповедника оказалась вполне устойчивой системой и просуществовала вплоть до середины XVII в., когда наступили самые холодные условия за последние 2640 кал. л. (Маундеровский минимум солнечной активности). В это время произошло снижение границы темнохвойных лесов, на склонах, окружающих оз. Нижнее, получил развитие ельник с кедром и незначительной примесью берез, широколиственных. При смягчении климата ельник сменился сначала елово-пихтовым лесом с кедром и примесью широколиственных, а затем в условиях современного потепления кедровником с участием темнохвойных и редкой примесью широколиственных. Наиболее сухой период за рассматриваемый период имел место примерно 2330 кал. л. н. В это время уровень озера значительно снизился, зарастание происходило осоково-злаковыми сообществами. Активное зарастание началось, когда понизился уровень грунтовых вод во время похолодания и существенного сокращения количества атмосферных осадков, около 1500 кал. л. н. Климатогенные сукцессии кедровых лесов Сихотэ-Алинского заповедника отражают региональные закономерности развития подобных лесных сообществ и сопоставляются с глобальными палеоклиматическими событиями.

Ключевые слова: Солонцовские (Шандуйские) озера, торфяник, пыльца, радиоуглеродное датирование, палеорекострукции, кедровые леса, Центральный Сихотэ-Алинь

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.5.6

ВВЕДЕНИЕ

Палеогеографические исследования в заповедниках и национальных парках России и за ее пределами могут рассматриваться в качестве методологической основы для проведения оценки уязвимости природных комплексов к изменениям климата и антропогенной нагрузке, с целью их сохранения и восстановления. Для исследований роли климатического фактора в развитии горно-таежных лесов Сихотэ-Алиня был выбран в качестве модельной территории Сихотэ-Алинский государ-

ственный природный биосферный заповедник имени К.Г. Абрамова, расположенный в центральной части Сихотэ-Алиня. Заповедник внесен в Список всемирного наследия ЮНЕСКО как объект, имеющий естественную среду обитания для сохранения исчезающих видов флоры и фауны. По геоботаническому районированию Б.П. Колесникова [1961] территория заповедника расположена в пределах двух геоботанических областей: Восточноазиатской хвойно-широколиственной и Южно-охотской темнохвойно-лесной. Сложный рельеф, а также со-

четание восточносибирских, охотских и маньчжурских видов растений обуславливают своеобразие растительных сообществ и относительное богатство флористического состава [Растительный..., 1982]. Господствующим типом растительного покрова заповедника является лесной, занимающий более 90% площади. Изучение динамики климата и растительности в прошлые эпохи позволит спрогнозировать возможные изменения растительных сообществ при различных сценариях будущих изменений климата [Новенко и др., 2014].

Цель данной работы – выявить взаимосвязи между изменением климата в позднем голоцене и развитием кедровых лесов на территории Сихотэ-Алинского заповедника.

Природные особенности района исследования.

Характерной особенностью рельефа заповедника является морфоструктурная асимметрия Сихотэ-Алиня: пологий западный макросклон и крутой восточный. Высшая точка заповедника – г. Глухоманка (1598 м). Климат на западном и восточном склонах Сихотэ-Алиня различен. На морском побережье лето прохладнее, а зима намного теплее, чем в континентальной части. Среднегодовая температура на берегу моря составляет +3,4°C, в предгорьях восточных склонов – 1,6°C, на западных склонах – 0,4°C. Годовое количество осадков – соответственно 813, 682 и 689 мм [Примпогода, 2023].

Растительность Сихотэ-Алинского заповедника имеет хорошо выраженную высотную поясность. Наиболее богатой и своеобразной во флористическом отношении лесной формацией заповедника являются кедрово-широколиственные леса, которые образуют самостоятельный пояс на высоте 200–600 м над уровнем моря (ур. м.).

Цепочка Солонцовских (Шандуйских) озер, расположенных на восточном макросклоне Сихотэ-Алиня, находится в верховьях ручья Солонцового – левого притока реки Заболоченной, среди руин палеоценового стратовулкана Солонцовский (Шандуйский), на высоте от 500 до 800 м над ур. м. (рис. 1). Образование 10 озер связано с мощным оползнем риолитовых лав и туфов, перекрывших русло ручья. Причиной его возникновения могло быть переувлажнение обильными осадками или землетрясение [Разжигаета и др., 2021]. Оползень, приведший к формированию оз. Изюбриные Солонцы, произошел около 4380 кал. л. н. [Разжигаета и др., 2017]. Уровень воды в озерах варьирует в зависимости от подземного стока. Самым крупным является оз. Большое Солонцовое (Царское). Озеро Изюбриные Солонцы находится на абс. высоте 750 м в поясе пихтово-еловых лесов (700–1200 м). Озеро Нижнее (100×50 м) расположено на высоте 565 м абс. на территории Сихотэ-Алинско-

го заповедника в пределах пояса кедровых лесов (400–700 м). В настоящее время оно представляет собой обводненное олиготрофно-дистрофное болото. Котловина оз. Нижнего заполнена торфом, открытая вода появляется здесь после сильных ливней. По берегам растет лиственница Каяндера (*Larix cajanderi*). Склоны покрыты кедровником с участием пихты белокорой (*Abies nephrolepis*) и ели аянской (*Picea ajanensis*). В травяном покрове преобладают пушицы Шейхцера и влагищная (*Eriophorum scheuchzeri*), осоки скрытоплодная и Миддендорфа (*Carex cryptocarpa*, *C. middendorffii*), встречается очеретник белый (*Rynchospora alba*), камыш озерный (*Schoenoplectus tabernaemontanii*), единично ирис, щитовник болотный (*Dryopteris thelypteris*), в небольшом количестве присутствуют сфагновые мхи [Разжигаета и др., 2021].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Реконструкция позднеголоценовой истории лесной растительности на территории Сихотэ-Алинского заповедника выполнена по палинологическим данным отложений оз. Нижнего (N 45°25'235", E 136°30'585") (см. рис. 1). Разрез (0317) был пробурен с помощью ручного торфяного бура Гиллера-1 (ТБГ-1) в краевой части озера. Вскрыто 3,25 м плотного торфа. Отбор проб проводился с шагом 5 см. Обработка образцов для спорово-пыльцевого анализа проводилась по методике В.П. Гричука. Определение таксонов выполняли с использованием специальных атласов-определителей [Nakamura, 1980]. При подсчете за 100% принималась сумма пыльцы древесной и травянистой растительности. Обработка данных и построение спорово-пыльцевой диаграммы проводились с помощью программы TILIA и TILIA-Graph. Пыльцевые зоны выделены на основе изменений таксономического состава спектров и с учетом их кластеризации при помощи программы CONISS.

Результаты ботанического состава торфа и диатомового анализа отложений оз. Нижнего для разреза 0317 опубликованы в [Разжигаета и др., 2021; Razjigaeva et al., 2023].

Радиоуглеродное датирование образцов торфа выполнено в СПбГУ. Калибровка радиоуглеродных дат сделана с помощью программы OxCal 4.4, калибровочная кривая IntCal 20. Калиброванный возраст определен по модели в программе Bacon 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Возрастная модель, созданная по шести радиоуглеродным датам (табл.), показала, что скорости торфонакопления в котловине оз. Нижнего были достаточно равномерными (рис. 2). На начальном эта-

пе торф накапливался со скоростью 0,8–1 мм/год. Около 1290 кал. л. н. скорости возросли до 1,6–1,7 мм/год, несколько снизились 980–620 кал. л. н. (до 1,4 мм/год), возросли около 620–320 кал. л. н. (1,6–1,7 мм/г) и уменьшились в последние 400 лет до 1,2–1,4 мм/год. Временное разрешение реконструкций составляет 50–60 лет, а для последних 1290 кал. л. – 30–40 лет [Раззигаева и др., 2021].

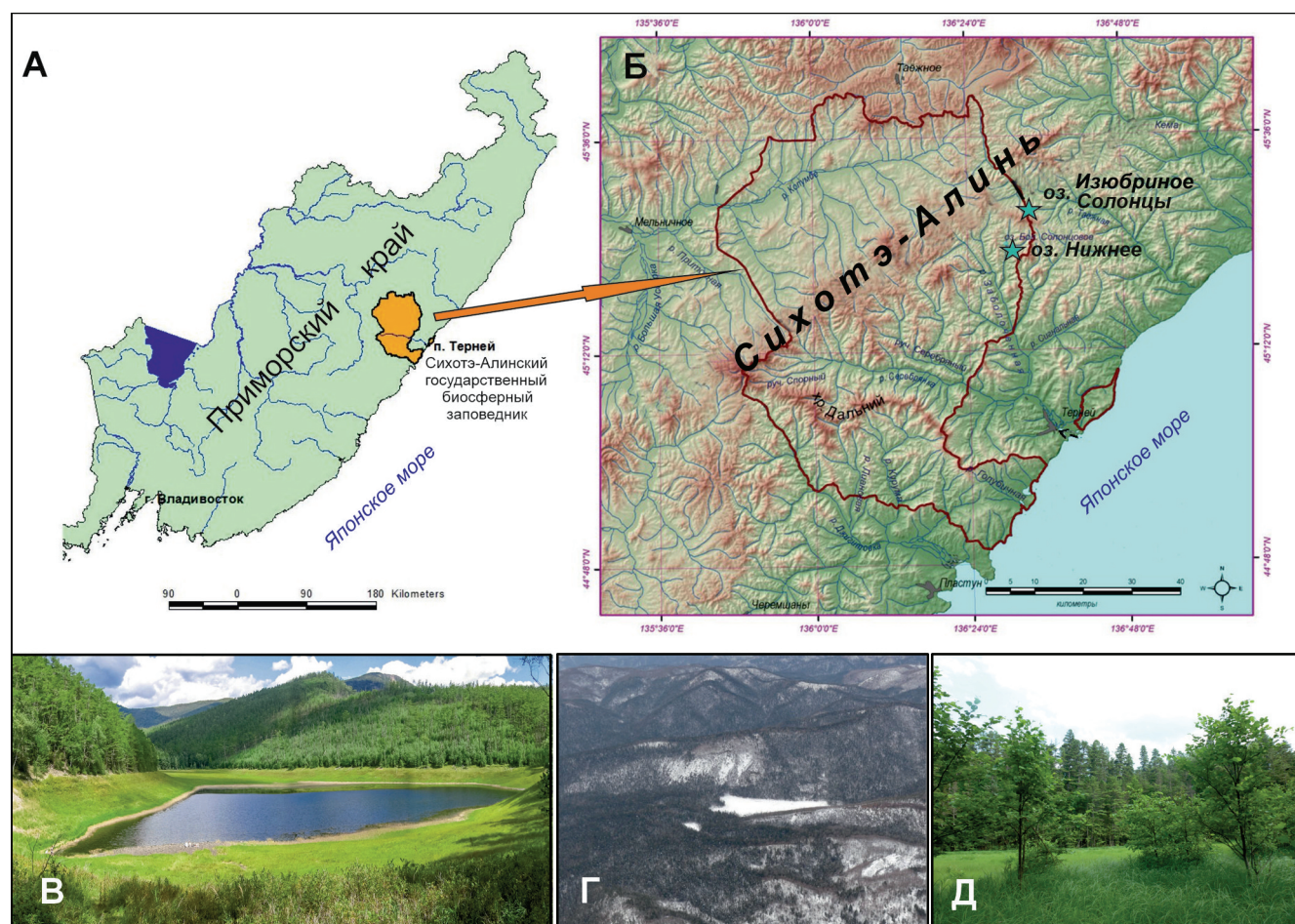


Рис. 1. Район работ и местоположение изученного озера:

А – географическое положение Сихотэ-Алинского биосферного заповедника; Б – схема расположения озер Нижнее и Изюбриные Солонцы; В – оз. Большое Солонцовское (Царское); Г – озера Большое Солонцовское и Нижнее; Д – оз. Нижнее

Fig. 1. Field work area and location of the studied lake:

A – geographical location of the Sikhote-Alin Biosphere Reserve; Б – location of Nizhnee and Izyubrinnye Solonci lakes; В – Bolshoe Solontsovskoe (Tsarskoe) Lake; Г – Bolshoe Solontsovskoe and Nizhnee lakes; Д – Nizhnee Lake

Таблица

Радиоуглеродный, календарный возраст и скорости накопления отложений озера Нижнее

Лаб. номер (ЛУ)	Интервал, см	Радиоуглеродный возраст, лет	Календарный возраст, кал. л. (2σ)	Моделированный возраст, кал. л.	Скорость торфонакопления по моделированному возрасту (интервал), мм/год
8838	45–50	470±100	480±100	285–320	1,2–1,4
8839	95–100	530±90	550±80	591–622	1,6–1,7
8840	145–150	1100±80	1030±90	944–980	1,4–1,5
8841	195–200	1220±60	1150±70	1258–1289	1,6–1,7
8842	245–250	1850±70	1780±90	1671–1814	1–1,2
8843	285–290	2330±70	2380±130	2220–2279	0,8–1

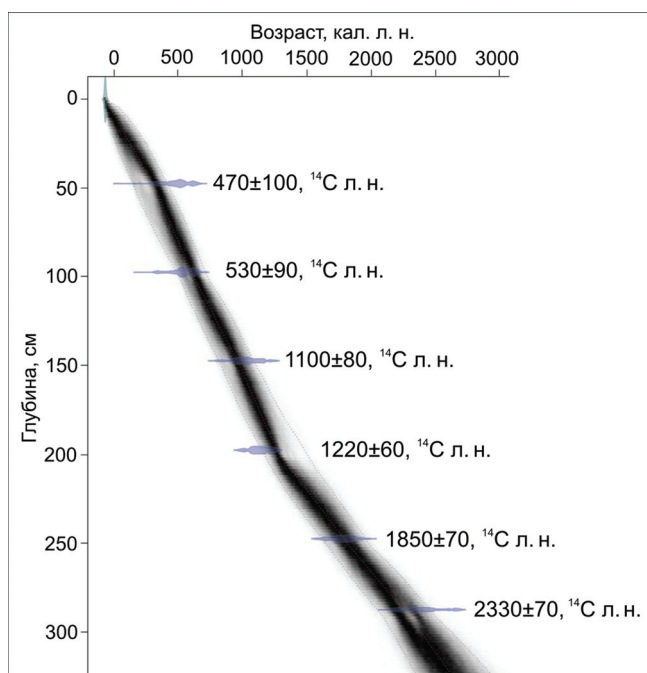


Рис. 2. Возрастная модель накопления отложений оз. Нижнего

Fig. 2. Age model of sediment accumulation in the Nizhnee Lake

Спорово-пыльцевой анализ. Согласно полученным результатам в спорово-пыльцевых спектрах изученного разреза преобладает пыльца деревьев и кустарников (51–92%), ведущие компоненты представлены пыльцой *Pinus* s/g *Haploxylon*, *Picea*, *Abies*, *Betula* sect. *Costatae* и *B. sect. Albae*, *Quercus mongolica*, *Alnus*. Пыльца *Larix*, *Ulmus*, *Corylus*, *Tilia*, *Spirea*, *Cornus*, *Juglans mandshurica*, *Carpinus cordata*, *Fraxinus*, *Salicaceae* и фригидных кустарников (*Betula* sect. *Fruticosa*, *Alnus alnobetula*) присутствует в небольшом количестве (до 3%). Группа трав немногочисленна (5–35%). Доминирует пыльца Сугерасеае, отмечена пыльца Роасеае, *Artemisia*, *Ranunculaceae*, а также мезофитов, гидрофитов и гигрофитов. В спектрах выявлены споры *Polypodiaceae*, *Sphagnum* и *Osmundastrum asiaticum*. На основании изменений состава спектров и кластерного анализа выделено 10 пыльцевых зон (ПЗ), соответствующих основным фазам развития растительности (рис. 3).

ПЗ 1 (2640–2330 кал. л. н., инт. 295–325 см). Характеризуется доминированием пыльцы хвойных: *Pinus* s/g *Haploxylon* (до 39%), *Picea* (до 15%), *Abies* (до 6%) и *Larix* (до 2%). Среди мелколиственных преобладает пыльца берез: *Betula* sect. *Costatae* (до 21%), *B. sect. Albae* (до 8%), *B. sect. Fruticosa* (до 2%). Присутствует пыльца *Alnus* (до 7%) и единично *A. alnobetula*. Из широколиственных встречена пыльца *Quercus mongolica* (до 9%), *Ulmus* (до 2%) и единично *Corylus*, *Tilia*, *Spirea*, *Cornus*, *Juglans mandshurica*, *Carpinus cordata* и *Fraxinus*. В группе трав (до 19%) доминирует пыльца

Сугерасеае (до 14%). В меньшем количестве присутствует пыльца Роасеае (до 5%) и других мезофитов. Из гидрофитов и гигрофитов (до 2%) найдена пыльца *Menyanthes trifoliata*, *Alisma orientale*, *Potamogeton*, *Nymphaea*, *Iris*. В ПЗ 1 отмечено максимальное обилие спор (до 21%) для всего разреза: *Polypodiaceae* (до 9%), *Osmundastrum asiaticum* (8%), *Sphagnum* (до 7%), единично *Equisetum*. Состав и соотношение основных компонентов спорово-пыльцевых спектров ПЗ 1 отражают как региональную растительность – кедровые леса с примесью темнохвойных, широколиственных и берез, так и азональную – заболоченный лиственный лес, а также локальную – водные и прибрежно-водные растения.

ПЗ 2 (2330–2050 кал. л. н., инт. 270–295 см). В начале ПЗ резко сокращается количество древесной пыльцы до 51% (минимальное значение для всего разреза) и увеличивается травянистой до 35% (максимум для всего разреза), но далее наблюдается постепенный рост объема древесной пыльцы. Здесь же зафиксировано самое высокое содержание пыльцы *Quercus* (до 13%). Доля *Pinus* s/g *Haploxylon* сокращается до 11%, уменьшается количество *Picea* и *Abies*. Учитывая, что содержание пыльцы широколиственных в современных спектрах существенно занижено по отношению к их участию в кедровниках, присутствие пыльцы широколиственных >10% свидетельствует об их существенной роли в древостое. В спектрах снижается участие *Alnus*, появляется *Salicaceae* (до 2% – максимальное содержание для всего разреза). В группе трав значительно увеличивается доля Сугерасеае (до 28%), уменьшается Роасеае. Количество спор сокращается до 2%. ПЗ 2 свидетельствует о развитии кедровника с дубом и большим участием березы.

ПЗ 3 (2050–1500 кал. л. н., инт. 220–270 см). Возрастает сумма пыльцы *Pinus* s/g *Haploxylon* до 41% и *Picea* до 18%. Содержание пыльцы *Betula* sect. *Costatae* – до 22%, *Abies* – до 3%. Уменьшается участие *Quercus* (до 4%), *B. sect. Albae*, *Salicaceae*. В группе трав снижается сумма Сугерасеае (до 10%), увеличивается доля мезофитов (до 6%). Участие спор – до 5%. ПЗ 3 говорит о развитии кедровых лесов с елью и пихтой, а также с незначительным участием широколиственных и березы ребристой (желтой).

ПЗ 4 (1500–1260 кал. л. н., инт. 195–220 см). Уменьшается количество широколиственных, *Betula* sect. *Costatae* (до 11%), *Alnus*. Содержание хвойных: *Pinus* s/g *Haploxylon* до 43%, *Picea* до 21%, *Abies* до 4%. В группе трав сокращается доля гидро- и гигрофитов, несколько возрастает у Роасеае, *Artemisia* и *Rosaceae*. Среди спор (до 6%) увеличивается участие *Polypodiaceae*. ПЗ 4 отражает распространение кедрово-еловых лесов с пихтой и кустарниковым подлеском с розоцветными.

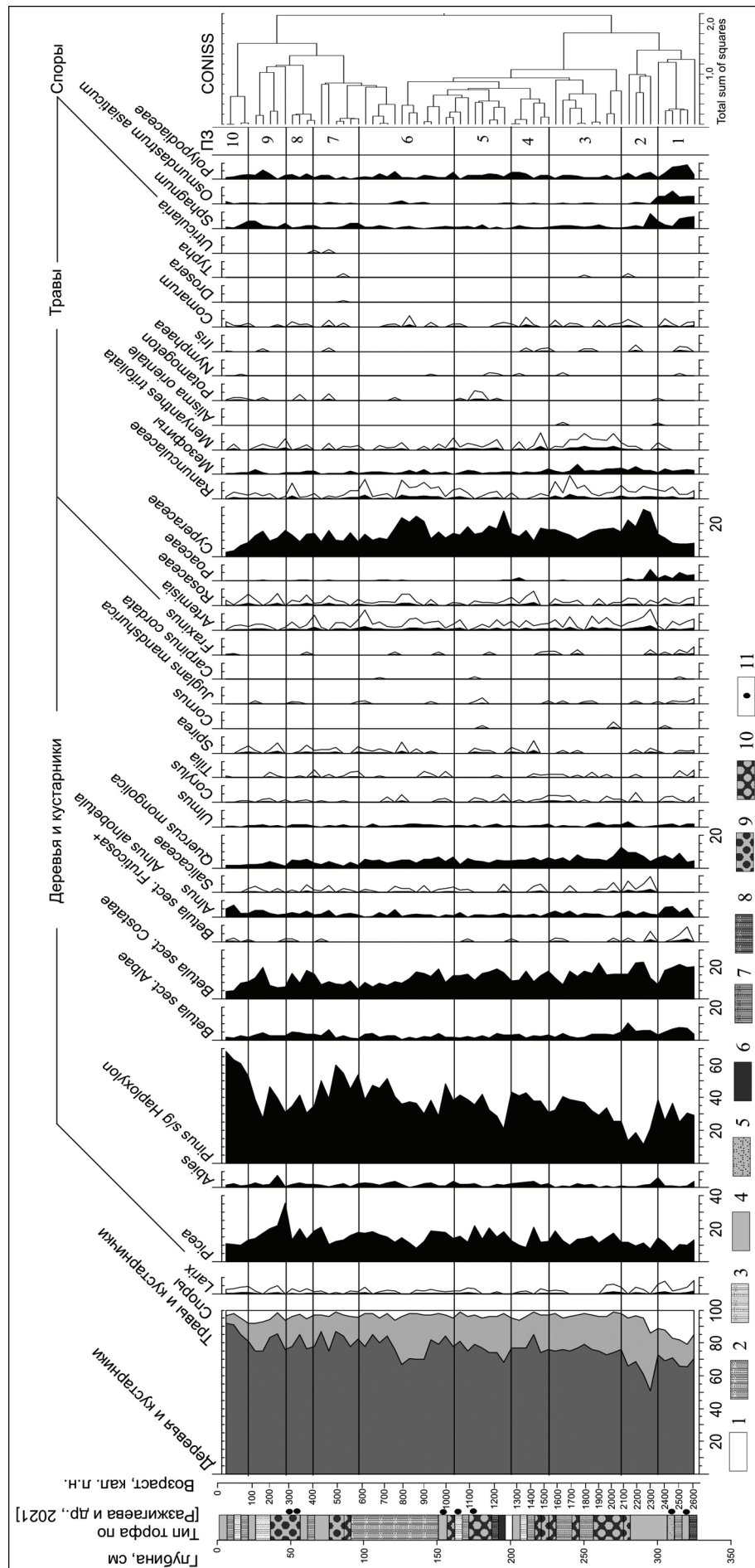


Рис. 3. Спорово-пыльцевая диаграмма разреза торфяника 0317, оз. Нижнее.

Типы торфа: 1 – сфагновый; 2 – травяно-сфагновый; 3 – сфагново-травяной; 4 – травяной; 5 – древесно-травяной; 6 – зеленомошный; 7 – травяно-зеленомошный; 8 – зеленомошно-травяной; 9 – мохово-травяной; 10 – травяно-моховой; 11 – угли.

Fig. 3. Spore-pollen diagram of peat bog section 0317, the Nizhnee Lake.

Peat types: 1 – Sphagnum; 2 – herb-Sphagnum; 3 – herb-Sphagnum; 4 – herb; 5 – woody-herb; 6 – green moss; 7 – herb-green moss; 8 – green-moss-herb; 9 – moss-herb; 10 – herb-moss; 11 – charcoal

ПЗ 5 (1260–1040 кал. л. н., инт. 160–195 см). Несколько увеличивается доля широколиственных и *Betula* sect. *Costatae* (до 18%). Роль *Pinus* s/g *Haploxylon* в начале ПЗ снижается до 21%, а Сурегасеае возрастает до 28%. Увеличивается количество пыльцы гидро- и гигрофитов: *Menyanthes trifoliata*, *Iris*, *Nymphaea*, *Comarum*. В группе споровых (до 5%) доминирует Polypodiaceae. ПЗ 5 говорит о развитии кедрово-широколиственного леса с доминированием кедра, кроме того здесь наблюдается два коротких эпизода, в течение которых количество широколиственных пород, берез, а также пихты уменьшается в составе древостоев, а вот кедра и ели возрастает. На заболоченных участках происходит развитие осоковых сообществ, вокруг озера появляется ива и возрастает присутствие ольхи.

ПЗ 6 (1040–590 кал. л. н., 95–160 см). Снижается количество пыльцы деревьев и кустарников до 67% и увеличивается трав до 29%, особенно Сурегасеае (до 24%) в середине ПЗ. Доля *Pinus* s/g *Haploxylon* возрастает до 51%, широколиственных – до 9%, а *Betula* sect. *Costatae* уменьшается до 8%. Сокращается участие гидро- и гигрофитов. Содержание спор – до 6%. ПЗ 6 свидетельствует о господстве кедрово-широколиственного леса с заметным участием широколиственных, а также о зарастании озера преимущественно осоковыми сообществами.

ПЗ 7 (590–380 кал. л. н., 60–95 см). Доля *Pinus* s/g *Haploxylon* в первой половине ПЗ увеличивается до 60%, а во второй уменьшается до 35%, участие *Picea* возрастает до 21%. Сокращается количество широколиственных, *Quercus* до 1%, а также *Betula* sect. *Costatae* до 6%. В группе трав доминирует Сурегасеае (до 16%), несколько возрастает содержание гидро- и гигрофитов: *Drosera*, *Menyanthes trifoliata*, *Iris*, *Typha*, *Comarum*, *Potamogeton*, *Utricularia*. Доля спор – до 4%, в начале ПЗ *Sphagnum* до 3%. В первой половине ПЗ 7 развивался кедровый лес с незначительным участием широколиственных и берез, а во второй он сменился на елово-кедровый.

ПЗ 8 (380–290 кал. л. н., 45–60 см). Увеличивается участие широколиственных до 9% и *Betula* sect. *Costatae* до 18%. Доля *Pinus* s/g *Haploxylon* снижается до 30%, *Picea* до 13%. В группе трав преобладает Сурегасеае (до 13%). Сумма спор – до 5%, доминирует Polypodiaceae. ПЗ 8 отражает доминирование в древостое кедра корейского с небольшой примесью широколиственных пород и берез.

ПЗ 9 (290–130 кал. л. н., 25–45 см). Зафиксировано самое большое количество пыльцы *Picea* до 35% в разрезе, с пиком в начале ПЗ, после которого следует пик *Abies* (8%). Содержание широколиственных, *Betula* sect. *Costatae*, *B.* sect. *Albae* уменьшается.

Участие *Pinus* s/g *Haploxylon* увеличивается после снижения доли темнохвойных. Среди трав преобладает Сурегасеае (до 16%). В группе споровых (до 7%) увеличивается присутствие Polypodiaceae и *Sphagnum*. Начало ПЗ 9 свидетельствует о развитии елового леса с незначительной примесью кедра, берез, широколиственных, но довольно скоро он становится елово-пихтовым, в его составе увеличивается доля кедра и широколиственных, появляется лиственница.

ПЗ 10 (последние 130 кал. л. н., 0–25 см). Зафиксировано самое высокое содержание пыльцы деревьев до 92% и *Pinus* s/g *Haploxylon* до 68% в разрезе. Доля *Picea*, *Abies* *Betula* sect. *Costatae*, *B.* sect. *Albae* и широколиственных уменьшается. Увеличивается участие *Alnus* до 7%. В группе трав (до 5%) сокращается количество Сурегасеае до 3%, уменьшается сумма спор до 2%. ПЗ 10 говорит об экспансии кедра в лесном фитоценозе, а также об увеличении участия лиственницы и ольхи вокруг озера.

Состав выделенных палинозон отражает изменения климатических условий на территории Сихотэ-Алинского заповедника за последние 2640 кал. л. н. В котловине в период 2640–2330 кал. л. н. существовало озеро с развитой литоральной зоной [Разжигаетова и др., 2021]. На окружающих склонах были распространены кедровники с елью и пихтой, дубом и березой, и осоково-мелкотравным с папоротниками покровом. В сложении древостоя единично встречались липа, ильм, лещина. На заболоченных участках произрастали лиственничники с ольхой и подлеском из кустарниковой березки, спиреи и вересковых. В травяном покрове преобладали осоки, злаки, полынь, а также значительное количество гидрофитов: вахта трехлистная (*Menyanthes trifoliata*), ирис, частуха восточная (*Alisma orientale*), хвощ. На озере встречались кувшинка, рдест. По данным ботанического состава торфа [Разжигаетова и др., 2021] на болоте росли камыш озерный, хвощ приречной (*Equisetum fluviatile*), кувшинка белая (*Nymphaea alba*) и сфагновые мхи. Климат был близок современному. Раннесубатлантическое потепление было также установлено на побережье юго-западного Приморья [Микишин и др., 2008]. На основе палеомагнитных моделей в периоды 640–550 и 490–420 л. до н. э. (2590–2500 и 2440–2370 кал. л. н. соответственно) были определены гранд-максимумы солнечной активности [Usoskin et al., 2007]. Ослабление Сибирского антициклона около 2500 кал. л. н. обусловило теплые, сухие и более континентальные летние периоды [Nagashima et al., 2013; Harada et al., 2014; Brooks et al., 2015] (рис. 4).

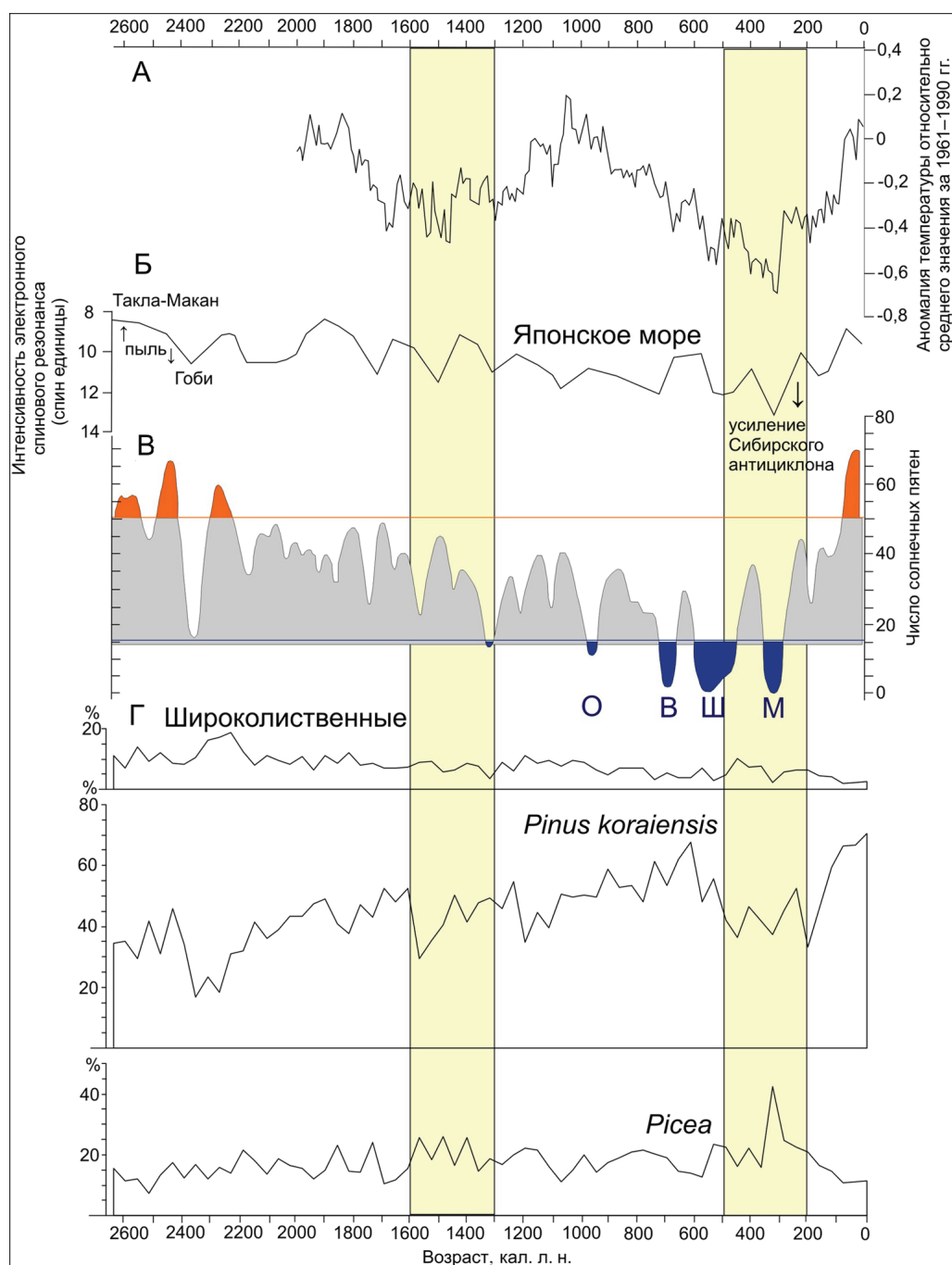


Рис. 4. Сопоставление выборочных прокси-записей из отложений оз. Нижнего с солнечной активностью, палеотемпературами, интенсивностью Сибирского антициклона и Восточно-азиатского летнего муссона:

А – изменение средней температуры внутритропического Северного полушария ($90\text{--}30^\circ$ с. ш.) относительно средней инструментальной температуры 1961–1990 гг. [Ljungqvist, 2010]; Б – сигнал кристаллов эолового кварца в илистой фракции в отложениях Японского моря, обнаруженный с помощью электронного спинного резонанса, как показатель атмосферной циркуляции [Nagashima et al., 2013; Harada et al., 2014]; В – флуктуации солнечной активности, голубые и оранжевые области обозначают гранд-минимумы и максимумы соответственно [Usoskin et al., 2007], периоды больших солнечных минимумов:

О – Оорта, В – Вольфа, Ш – Шперера, М – Маундера; Г – пыльца широколиственных, *Pinus koraiensis* и *Picea* (%).

Вертикальные желтые полосы показывают периоды ослабления летнего муссона [Li et al., 2011]

Fig. 4. Comparison of selected proxy records from the Nizhnee Lake sediments with solar activity, palaeotemperatures, and intensity of the Siberian High and the East Asian summer monsoon:

A – variations of decadal mean temperature of the extra-tropical Northern Hemisphere ($90\text{--}30^\circ\text{N}$) relative to 1961–1990 mean instrumental temperature [Ljungqvist, 2010]; Б – source signal of aeolian silt-sized quartz in the Japan Sea sediments revealed by electron spin resonance, as a proxy of atmospheric circulation [Nagashima et al., 2013; Harada et al., 2014]; В – sunspot activity, blue and orange areas denote grand minima and maxima, respectively [Usoskin et al., 2007], periods of the Grand Solar Minima:

О – Oort, В – Wolf, Ш – Spörer, М – Maunder; Г – Broad-leaved, *Pinus koraiensis* and *Picea* pollen (%). The vertical yellow bars show the periods of summer monsoon weakening [Li et al., 2011]

Около 2330 кал. л. н. по данным диатомового анализа [Разжигаета и др., 2021] произошло кратковременное снижение уровня озера. На осушенных участках развивались осоково-злаковые сообщества, по берегам на сырых лугах появилась ива. Период 2330–2280 кал. л. н. был самым сухим за последние 2640 кал. л. Исследования оз. Изюбринные Солонцы показали, что в это время уровень грунтовых вод упал, озеро обмелело и сократило свою площадь [Разжигаета и др., 2017].

Примерно 2280–2110 кал. л. н. происходит максимальное обводнение оз. Нижнего [Разжигаета и др., 2021]. На окружающих склонах развиваются смешанные хвойно-широколиственные леса с большим участием березы. Наступление неморальных лесов на тайгу было связано с повышением среднегодовых и среднелетних температур [Урусов, 1988]. Климат был теплее и влажнее современного. Улучшение климатических условий привело к очередной трансгрессии Японского моря [Микишин и др., 2008]. В период 300–230 л. до н. э. (2250–2180 кал. л. н.) был выделен гранд-максимум солнечной активности [Usoskin et al., 2007] (см. рис. 4).

Около 2050 кал. л. н. климатические условия ухудшаются. На месте хвойно-широколиственных лесов развиваются кедровники с елью и пихтой, незначительным участием широколиственных, а также берез. Климат был холоднее современного. Уровень моря располагался ниже современного [Микишин и др., 2008]. Для северо-восточного Китая отмечено значительное увеличение содержания пыльцы *Pinus koraiensis* в спорово-пыльцевых комплексах, начиная с 1900 кал. л. н. [Li et al., 2011]. А в течение 1800–1100 кал. л. н. наблюдается максимум пыльцы *Abies* и *Picea*, указывающий на расширение ареала темнохвойных лесов и холодный, влажный климат этой территории. Температура упала примерно на 2°C [Sun, Yuan, 1990]. В Японии 1760–1220 кал. л. н. отмечена холодная стадия климата «Кофун» [Sakaguchi, 1983]. В период 1650–1350 л. н. выделяется глобальное холодное событие – похолодание Темных веков, связанное со снижением инсоляции [Ljungqvist, 2010] (см. рис. 4).

Около 1500 кал. л. н. количество широколиственных в кедровых лесах заметно уменьшается, снижается участие берез, ольхи. Вокруг озера единично встречались лиственница и ива, сократились водные и прибрежно-водные сообщества, по берегам увеличилось мезофильное разнотравье. Примерно 1440 кал. л. н. усиливается роль темнохвойных. Пик похолодания в районе Солонцовских озер (1500–1440 кал. л. н.) сопровождался существенным сокращением количества атмосферных осадков, понижением уровня грунтовых вод и периодом сильного зарастания озера [Разжигаета и др.,

2021]. Причиной снижения количества атмосферных осадков могло быть ослабление летнего муссона около 1600–1300 л. н. [Li et al., 2011]. Усиление похолодания 1480–1330 кал. л. н. было зафиксировано на восточном, юго-восточном и южном побережьях Приморья [Короткий и др., 2004; Микишин, Гвоздева, 2014; Лящевская и др., 2023], а также на побережье оз. Ханка [Микишин и др., 2007]. Похолодание было отмечено на Сахалине [Микишин, Гвоздева, 2016; Leipe et al., 2015] и в Охотском море [Gorbarenko et al., 2014]. Глобальный характер события подтверждается его регистрацией в ядрах льда Гренландии [Mayewski et al., 2004], а также в других регионах Азии с муссонным климатом [Hong et al., 2003; Wang et al., 2005; Leipe et al., 2014]. В период 650–720 гг. н. э. был определен гранд-минимум солнечной активности [Usoskin et al., 2007] (см. рис. 4).

Примерно 1260 кал. л. н. в кедровых лесах увеличивается доля широколиственных, а также березы. В результате увеличения влажности на заболоченных участках развиваются осоковые сообщества. Климат становится более теплым и влажным по отношению к предыдущему, был близок современному, соответствует наступлению средневекового климатического оптимума (VIII–XIII вв.). Реконструированные летние температуры для восточного Приморья превышали современные примерно на 1,5°C [Назарова и др., 2021]. На островном и континентальном побережьях юга Дальнего Востока, потепление проявилось во всех ландшафтных зонах [Razjigaeva et al., 2019]. В Японии теплая стадия Нара-Хейан-Камакура (1220–650 кал. л. н.) характеризовалась более теплыми зимними и летними сезонами [Sakaguchi, 1983]. По мнению В.М. Федорова и П.Б. Гребенникова [2020], средневековый климатический оптимум был связан, прежде всего, с зимним потеплением в Северном полушарии из-за максимума в меридиональном переносе тепла. Уровень Японского моря поднялся примерно на 0,5 м по отношению к современному, трансгрессия продолжалась не менее 400 лет [Короткий и др., 2004].

Потепление в течение средневекового климатического оптимума перемежалось кратковременными холодными периодами. Около 1190 кал. л. н. в составе древостоев уменьшается количество широколиственных пород, берез и пихты, возрастает кедр и ель. Уровень оз. Нижнего снизился [Разжигаета и др., 2021], водоем стал зарастать травянистой растительностью. Причиной могло быть кратковременное похолодание. Но примерно через 60 лет вновь наблюдается тенденция на увеличение доли широколиственных. Около 1070 кал. л. н. наступает очередной кратковременный холодный период, резко сокращается участие широколиственных пород и несколько увеличивается роль кедра, ели и ольхи. Ус-

ловия были достаточно сухими. Возможно, что некоторое влияние на изменения в растительном покрове оказал пирогенный фактор [Разжигаета и др., 2021].

В период 1040–590 кал. л. н. на территории Сихотэ-Алинского заповедника наступают самые теплые условия в течение средневекового климатического оптимума. Доля широколиственных увеличивается. Самые теплые условия для оз. Изюбриные Солонцы были около 880–730 кал. л. н., зафиксировано максимальное количество пыльцы дуба, уменьшение содержания ели и увеличение пихты [Разжигаета и др., 2017]. Изучение структуры местной популяции тиса остроконечного (*Taxus cuspidate*) – реликта третичного периода, в Сихотэ-Алинском заповеднике показало, что существуют группы особей, возрастом 850–1040 лет и 650–720 лет, появившиеся в периоды максимального благоприятствования (мягкий гумидный климат) для развития тиса [Растительный..., 2000]. В докладе МГЭИК [IPCC..., 2013] климат с 950–1250 гг. н. э. в Северном полушарии был признан аномально теплым и мягким.

Около 910–760 кал. л. н. происходит снижение уровня оз. Нижнего и активное зарастание. Возможно, иногда оно полностью зарастало [Разжигаета и др., 2021] осоковыми сообществами. Уменьшение количества атмосферных осадков и снижение обводнения зафиксировано и для оз. Изюбриные Солонцы [Разжигаета и др., 2017]. Причиной могло быть похолодание, в результате гранд-минимума солнечной активности Оорта в 1010–1070 гг. н. э. [Usoskin et al., 2007] (см. рис. 4).

В течение 590–380 кал. л. н. заметно сокращается участие широколиственных пород и берез. Доля кедра в первой половине периода увеличивается, а во второй уменьшается, в то время как участие ели возрастает. Таким образом, вторая половина периода была холоднее. В отложениях оз. Изюбриные Солонцы возрастом около 580 и 440 кал. л. н. отмечено почти полное исчезновение пыльцы широколиственных пород [Разжигаета и др., 2017]. В юго-восточном Приморье в период с 1330 по 1630 г. зимние температуры были значительно ниже, чем в последующие 250 лет [Лящевская и др., 2023]. Зафиксированное на территории заповедника похолодание совпадает с наступлением малого ледникового периода (середина XIV в. – первая половина XIX в.). Расширение ледников произошло в XIV и в XVII–XVIII вв. В интервале 1390–1550 гг. был определен гранд-минимум солнечной активности Шперера [Usoskin et al., 2007]. Холодные зимы во время малого ледникового периода были вызваны усилением Сибирского антициклона [Brooks et al., 2015]. На территории Северо-Восточного Китая в период 500–200 кал. л. н. наблюдалось ослабление муссонов [Li et al., 2011] (см. рис. 4).

Примерно 380 кал. л. н. климат улучшился, увеличилось участие широколиственных и берез, произошло кратковременное обмеление оз. Нижнего [Разжигаета и др., 2021]. На территории Сихотэ-Алинского заповедника есть группа особей тиса, возрастом 390–520 лет, которая появилась в период улучшения климатических условий в течение малого ледникового периода [Растительный..., 2000]. По данным дендрохронологии в Южном Сихотэ-Алине теплые периоды имели место в 1560–1585, 1600–1610, 1614–1618 гг. [Ukhvatkina et al., 2018].

Около 290 кал. л. н. в лесном фитоценозе происходит смена доминантов, широкое развитие получают еловые леса с незначительной примесью кедра, берез, широколиственных. Возможно некоторое влияние на смену растительности оказали пожары около озера 350–290 кал. л. н. [Разжигаета и др., 2021]. Примерно через 40 лет фитоценотические позиции ели уменьшаются и резко увеличиваются у пихты. Возрастает участие кедра и широколиственных. Зафиксированное похолодание совпадает с Маундеровским гранд-минимумом солнечной активности (1640–1720 гг.) [Usoskin et al., 2007] – самым холодным временем малого ледникового периода (см. рис. 4) и самым холодным периодом за последние 2640 кал. л. н. в центральном Сихотэ-Алине. Холодная фаза на оз. Изюбриные Солонцы произошла около 330–160 кал. л. н., когда в лесной растительности уменьшилась роль широколиственных и возросло участие ели [Разжигаета и др., 2017]. Холодная температурная аномалия в южном Сихотэ-Алине по данным дендрохронологии произошла в 1675–1689 гг. [Ukhvatkina et al., 2018]. Анализ исторических документов для Северо-Китайской равнины и реконструкция зимних полугодовых (с октября по апрель следующего года) рядов температур показал, что наиболее холодная фаза малого ледникового периода 1651–1700 гг. имела аномалию $-0,83^{\circ}\text{C}$ [Yan et al., 2014]. Для восточного Приморья реконструировано снижение летних температур на $1,5\text{--}2^{\circ}\text{C}$ [Назарова и др., 2021]. В Японии похолодание сопровождалось увеличением осадков [Sakaguchi, 1983]. В этот период произошла регрессия моря [Короткий, 2004].

В последние 250 кал. л. на оз. Нижнем имело место прогрессирующее обмеление, обусловленное эндогенным развитием, и активное заболачивание [Разжигаета и др., 2021]. В последние 130 кал. л. значительно увеличилось участие кедра. Доля ели, пихты, а также берез и широколиственных уменьшилась. В кровле отложений оз. Изюбриные Солонцы также отмечено максимальное количество пыльцы кедра [Разжигаета и др., 2017]. В настоящее время в Приморье наблюдается процесс распространения кедра корейского к северу. Повы-

шение среднегодовых и среднелетних температур приводит к усыханию таежных древостоев и внедрению в ценоз кедра [Урусов, 1988]. В последние годы выявлен общий тренд – возрастание прироста и расширение ареала кедра в разных регионах мира: в нижней полосе среднегорья за счет увеличения влажности; в верхней полосе среднегорья из-за роста температур [Куулар, 2023].

ВЫВОДЫ

Изученный разрез торфяника оз. Нижнего оказался чутким индикатором климатических изменений. Полученные данные позволили рассмотреть историю смен растительных сообществ пояса кедрово-широколиственных лесов Сихотэ-Алинского заповедника за последние 2640 кал. л. н. Около 2640 кал. л. н. в условиях умеренно теплого климата на месте современного кедровника развивались кедрово-дубовые формации с участием ели и пихты.

При наступлении наиболее теплых условий, около 2280 кал. л. н., произошло максимальное обводнение оз. Нижнего, увеличение его площади и активное развитие водной и прибрежно-водной растительности. Повышение среднегодовых и среднелетних температур способствовало снижению в ценозах позиций доминанта – кедров и усилению роли дуба монгольского. Ухудшение климатических условий около 2050 кал. л. н. привело к смене хвойно-широколиственного леса формацией кедровников, которая на территории Сихотэ-Алинского заповедника оказалась вполне устойчивой системой и просуществовала вплоть до середины XVII в., когда наступили самые холодные условия (Маундеров-

ский минимум солнечной активности) за последние 2640 кал. л. В это время произошло снижение границы темнохвойных лесов, развитие получил ельник с кедром и незначительной примесью других пород. При смягчении климата ельник сменился елово-пихтовым лесом с кедром и примесью широколиственных, а затем в условиях современного потепления кедровником с участием темнохвойных и редкой примесью широколиственных.

Средневековый температурный оптимум реконструирован для Сихотэ-Алинского заповедника с 1260 по 590 кал. л. н. Улучшение климата было не таким значительным как в раннесубатлантическое потепление и перемежалось кратковременными холодными периодами около 1190 и 1070 кал. л. н.

Во время похолоданий (около 2050–1260, 1190–1130, 1070–1040, 590–380, 290–130 кал. л. н.) в древостоях увеличивалось количество ели, а при потеплении (2640–2050, 1260–1190, 1130–1070, 1040–590, 380–290, последние 130 кал. л. н.) активизировался кедр корейский и широколиственные, особенно дуб монгольский.

Наиболее сухой период имел место примерно 2330 кал. л. н. Активное зарастание оз. Нижнего началось около 1500 кал. л. н., когда понизился уровень грунтовых вод, причиной послужило похолодание и существенное сокращение количества атмосферных осадков.

Климатогенные сукцессии кедровых лесов Сихотэ-Алинского заповедника отражают региональные закономерности развития подобных лесных сообществ и сопоставляются с глобальными палеоклиматическими событиями.

Благодарности. Авторы благодарят дирекцию и сотрудников Сихотэ-Алинского биосферного заповедника за помощь в организации и проведении полевых работ. Исследования выполнены в рамках государственного задания ТИГ ДВО РАН № 122020900184-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Колесников Б.П. Растительность // Дальний Восток. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 183–246.
- Короткий А.М., Андерсон П.М., Ложкин А.В. и др. О развитии ландшафтов юго-восточного Приморья в среднем и позднем голоцене // Пространственно-временная изменчивость природной среды Северо-Восточной Азии в четвертичный период. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2004. С. 12–50.
- Куулар Х.Б. Состояние и динамика границ темнохвойных лесов хребта Западный Танну-Ола в Республике Тыва // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2023. Т. 78. № 4. С. 40–50. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.4.
- Лящевская М.С., Базарова В.Б., Макарова Т.Р. Развитие природной среды и эволюция озера Гнилое (Юго-Восточное Приморье) за последние 3300 лет // Геоморфология и палеогеография. 2023. Т. 54. № 3. С. 108–123. DOI: 10.31857/S2949178923030064.
- Микишин Ю.А., Гвоздева И.Г. Палеосреда острова Русский (Южное Приморье) в среднем – позднем голоцене // Фундаментальные исследования. 2014. № 3. С. 516–522.
- Микишин Ю.А., Гвоздева И.Г. Поздний субатлантис Южного Сахалина // Успехи современного естествознания. 2016. № 9. С. 137–142.
- Микишин Ю.А., Петренко Т.И., Гвоздева И.Г. и др. Голоцен побережья Юго-Западного Приморья // Научное обозрение. 2008. № 1. С. 8–27.
- Микишин Ю.А., Петренко Т.И., Попов А.Н. и др. Палеогеография озера Ханка в позднем голоцене // Научное обозрение. 2007. № 2. С. 7–13.
- Назарова Л.Б., Разжиганова Н.Г., Головатюк Л.В. и др. Развитие экологических условий позднего голоцена // Сибирский экологический журнал. 2021. № 3. С. 274–290. DOI: 10.15372/SEJ20210302.

- Новенко Е.Ю., Зюганова И.С., Ольчев А.В. Применение метода палеоаналогов для прогноза динамики растительности при изменениях климата // Доклады академии наук. 2014. Т. 457. № 1. С. 117–121. DOI: 10.7868/S0869565214190311.
- Разжигаяева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А. и др. Развитие Солонцовских озер как показатель динамики увлажнения в Центральном Сихотэ-Алине в позднем голоцене // Геосистемы переходных зон. 2021. Т. 5. № 3. С. 287–304. DOI: 10.30730/gtrz.2021.5.3.287-304.
- Разжигаяева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А. и др. Изменения природной среды в позднем голоцене, зафиксированные в отложениях озера Изюбринные Солонцы, Сихотэ-Алинь // Сибирский экологический журнал. 2017. № 4. С. 512–527. DOI: 10.15372/SEJ20170411.
- Растительный и животный мир Сихотэ-Алинского заповедника / под ред. Н.Г. Васильева, Е.Н. Матюшкина. М.: Наука, 1982. 304 с.
- Растительный мир Сихотэ-Алинского биосферного заповедника: разнообразие, динамика, мониторинг / А.В. Галанин и др. Владивосток: Биолого-почвенный институт ДВО РАН, 2000. 373 с.
- Урусов В.М. Генезис растительности и рациональное природопользование на Дальнем Востоке. Владивосток: ДВО РАН СССР, 1988. 356 с.
- Федоров В.М., Гребенников П.Б. Малый (средневековый) климатический оптимум голоцена и его возможные причины // Жизнь Земли. 2020. Т. 42. № 4. С. 395–405. DOI: 10.29003/ml1768.0514-7468.2020_42_4/395-405.
- Brooks S.J., Diekmann B., Jones V.J. et al. Holocene environmental change in Kamchatka: A synopsis, *Glob. Planet. Change*, 2015, vol. 134, p. 166–174, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2015.09.004.
- Gorbarenko S.A., Artemova A.V., Goldberg E.L. et al. The response of the Okhotsk Sea environment to the orbital-millennium global climate changes during the Last Glacial Maximum, deglaciation and Holocene, *Glob. Planet. Change*, 2014, vol. 116, p. 76–90, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2014.02.002.
- Harada N., Katsuki K., Nakagawa M. et al. Holocene sea surface temperature and sea ice extent in the Okhotsk and Bering Seas, *Prog. Oceanogr.*, 2014, vol. 126, p. 242–253, DOI: 10.1016/j.pocean.2014.04.017.
- Hong Y.T., Hong B., Lin Q.H. et al. Correlation between Indian Ocean summer monsoon and North Atlantic climate during the Holocene, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, vol. 211, no. 3–4, p. 371–380, DOI: 10.1016/S0012-821X(03)00207-3.
- IPCC 2013. Climate Change. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T.F. Stocker et al. (eds.), Cambridge and New York, Cambridge University Press, 2013, 1535 p.
- Leipe C., Demske D., Tarasov P.E. A Holocene pollen record from the northwestern Himalayan lake Tso Moriri: implications for palaeoclimatic and archaeological research, *Quat. Int.*, 2014, vol. 348, p. 93–112, DOI: 10.1016/j.quaint.2013.05.005.
- Leipe C., Nakagawa T., Gotanda K. et al. Late Quaternary vegetation and climate dynamics at the northern limit of the East Asian summer monsoon and its regional and global-scale controls, *Quat. Science Reviews*, 2015, vol. 116, p. 57–17, DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.03.012.
- Li C., Wu Ya., Hou X. Holocene vegetation and climate in Northeast China revealed from Jingbo Lake sediment, *Quat. Int.*, 2011, vol. 229, p. 67–73, DOI: 10.1016/j.quaint.2009.12.015.
- Ljungqvist F.C. A new reconstruction of temperature variability in the extratropical Northern Hemisphere during the last two millennia, *Geogr. Ann.*, 2010, vol. 92A, no. 3, p. 339–351.
- Mayewski P.A., Rohling E.E., Stager J.C. et al. Holocene climate variability, *Quat. Res.*, 2004, vol. 62, no. 3, p. 243–255, DOI: 10.1016/j.yqres.2004.07.001.
- Nagashima K., Tada R., Toyoda S. Westerly Jet – East Asian summer monsoon connection during the Holocene, *Geochim. Geophys. Geosyst.*, 2013, vol. 14, p. 5041–5053, DOI: 10.1002/2013GC004931.
- Nakamura J. Diagnostic characters of pollen grains of Japan, Part 2, *Special publications from Museum of Natural History*, 1980, vol. 12; includes 157 plates.
- Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Bazarova V.B. et al. Landscape response to the Medieval Warm Period in the South Russian Far East, *Quat. Int.*, 2019, vol. 519, p. 215–231, DOI: 10.1016/j.quaint.2018.12.006.
- Razjigaeva N., Ganzey L., Grebennikova T. et al. High-resolution lacustrine records of the Late Holocene hydroclimate of the Sikhote-Alin Mountains, Russian Far East, *Biology*, 2023, vol. 12, p. 913, DOI: 10.3390/biology12070913.
- Sakaguchi Y. Warm and cold stages in the past 7600 years in Japan and their global correlation – especially on climatic impacts to the global sea level changes and ancient Japanese history, *Bull. of the depart. Geography University of Tokyo*, 1983, vol. 15, p. 1–31.
- Sun X.J., Yuan S. The pollen data and vegetation evolution during the 10,000 years in Jinchuan area, Jilin Province, *Quaternary Geology and Global Change*, Part 2, Beijing, Science Press, 1990, p. 46–57. (In Chinese)
- Ukhvatkina O.N., Omelko A.M., Zhmerenetsky A.A., Petrenko T.Y. Autumn-winter minimum temperature changes in the southern Sikhote-Alin mountain range of northeastern Asia since 1529 AD, *Climate of the Past*, 2018, vol. 14, p. 57–71, DOI: 10.5194/cp-14-57-2018.
- Usoskin I.G., Solanki S.K., Kovaltsov G.A. Grand minima and maxima of solar activity: new observational constraints, *A&A*, 2007, vol. 471, p. 301–309, DOI: 10.1051/0004-6361:20077704.
- Wang Y.J., Cheng H., Edwards R.L. et al. The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate, *Science*, 2005, vol. 308, p. 854–857, DOI: 10.1126/science.1106296.
- Yan J., Ge Q., Liu H. et al. Reconstruction of sub-decadal winter half-year temperature during 1651–2010 for the North China Plain using records of frost date, *Atmospheric and Climate Sciences*, 2014, vol. 4, no. 2, p. 211–218, DOI: 10.4236/acs.2014.42024.

Электронный ресурс

Примпогода. URL: <http://www.Primpogoda.ru> (дата обращения 15.07.2023).

Поступила в редакцию 12.02.2024

После доработки 10.04.2024

Принята к публикации 26.06.2024

INFLUENCE OF THE LATE HOLOCENE CLIMATE CHANGES ON FOREST ECOSYSTEMS OF THE SIKHOTE-ALIN BIOSPHERE RESERVE FROM THE DATA OF SPORE-POLLEN ANALYSIS OF LAKE SEDIMENTS

M.S. Lyashchevskaya¹, A.M. Panichev²

^{1,2} Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

¹ Laboratory of Paleogeography and Geomorphology, Leading Scientific Researcher,
Ph.D. in Geography; e-mail: lyshevskay@mail.ru

² Laboratory of Ecology and Animal Protection, Leading Scientific Researcher; D.Sc. in Biology; e-mail: sikhote@mail.ru

The relationship between climate change in the Late Holocene and evolution of Korean pine forests in the mid-mountain zone of the Sikhote-Alin Biosphere Reserve has been studied. Under moderately warm climate about 2640 cal BP Korean pine-oak formations, with admixture of Ayan spruce (*Picea ajanensis* (Lindl. et Gord.)), Khingam fir (*Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim.), and broad-leaved species, birches, alder and larch, developed in place of the modern Korean pine forests. With maximum warming around 2280 cal BP, maximum watering of the Nizhnee Lake occurred; its area increased and the aquatic and coastal-aquatic vegetation developed actively. Rising average annual and average summer temperatures contributed to a decrease in the position of Korean pine (*Pinus koraiensis* Sieb. Et Zucc.) as a dominant in phytocenoses and stronger presence of Mongolian oak (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb). Climate breakdown around 2050 cal BP have led to the replacement of coniferous-broad-leaved forest by the Korean pine forests formation, which turned out to be a completely stable system within the Sikhote-Alin Nature Reserve and existed until the middle of the 17th century, when the coldest conditions for the last 2640 cal BP (the Maunder minimum of solar activity) occurred. At that time the limit of dark coniferous forests on the slopes surrounding the Nizhnee Lake became lower and spruce forest with Korean pine and small admixture of birch and broad-leaved trees got wider spread. Under more comfort climate conditions the spruce forest was replaced first by spruce-fir forests with Korean pine and an admixture of broad-leaved trees, and then, under modern warming conditions, by the Korean pine forest with some dark conifers and a rare admixture of broad-leaved trees. The driest period during the time interval under study occurred at approximately 2330 cal BP. The lake level decreased significantly at that time, and it was overgrown with sedge-grass family communities. Active overgrowing began when the groundwater level decreased during cooling and a significant reduction in the amount of atmospheric precipitation at about 1500 cal BP. Climate-induced successions of Korean pine forests of the Sikhote-Alin Nature Reserve reflect regional patterns of development of such forest communities and could be correlated with global paleoclimatic events.

Keywords: Solontsovskie (Shanduiskie) Lakes, peat bog, pollen, radiocarbon dating, paleoreconstructions, Korean pine forests, Central Sikhote-Alin

Acknowledgements. The authors thank the management and staff of the Sikhote-Alin Biosphere Reserve for assistance in organizing and conducting field work. The research was carried out within the framework of the state assignment of the TIG FEB RAS No. 122020900184-5.

REFERENCES

- Brooks S.J., Diekmann B., Jones V.J., Hammarlund D. Holocene environmental change in Kamchatka: A synopsis, *Glob. Planet. Change*, 2015, vol. 134, p. 166–174, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2015.09.004.
- Fedorov V.M., Grebennikov P.B. Malyyi Srednevekovyy klimaticheskiy optimum golotsena i ego vozmozhnye prichiny [Medieval warm period of the Holocene and its possible causes], *Zhizn' Zemli*, 2020, vol. 42, no. 4, p. 395–405, DOI: 10.29003/m1768.0514-7468.2020_42_4/395-405. (In Russian)
- Gorbarenko S.A., Artemova A.V., Goldberg E.L., Vasilenko Y.P. The response of the Okhotsk Sea environment to the orbital-millennium global climate changes during the Last Glacial Maximum, deglaciation and Holocene, *Glob. Planet. Change*, 2014, vol. 116, p. 76–90, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2014.02.002.
- Harada N., Katsuki K., Nakagawa M. et al. Holocene sea surface temperature and sea ice extent in the Okhotsk and Bering Seas, *Prog. Oceanogr.*, 2014, vol. 126, p. 242–253, DOI: 10.1016/j.pcean.2014.04.017.
- Hong Y.T., Hong B., Lin Q.H. et al. Correlation between Indian Ocean summer monsoon and North Atlantic climate during the Holocene, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, vol. 211, no. 3–4, p. 371–380, DOI: 10.1016/S0012-821X(03)00207-3.
- IPCC 2013. *Climate Change: the Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T.F. Stocker et al. (eds.), Cambridge and New York, Cambridge University Press, 2013, 1535 p.
- Kolesnikov B.P. [Vegetation], *Dal'nii Vostok* [Far East], 1961, p. 183–246. (In Russian)
- Korotkii A.M., Anderson P.M., Lozhkin A.V. et al. [Development of landscapes in Southeastern Primor'ye during the Middle and Late Holocene], *Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' prirodnoy sredy Severo-Vostochnoy Azii v chetvertichnyy period* [Spatio-temporal variability of the natural environment of North-Western Asia during the Quaternary], 2004, p. 12–50. (In Russian)

- Kuular Kh.B. Sostoyanie i dinamika granits temnokhvoynykh lesov khrebta Zapadnyi Tannu-Ola v respublike Tyva [The state and dynamics of the borders of cedar forests at the western Tannu-Ola Range in the Tyva Republic], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2023, vol. 78, no. 4, p. 40–50, DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.4. (In Russian)
- Leipe C., Demske D., Tarasov P.E. A Holocene pollen record from the northwestern Himalayan lake Tso Moriri: implications for palaeoclimatic and archaeological research, *Quat. Int.*, 2014, vol. 348, p. 93–112, DOI: 10.1016/j.quaint.2013.05.005.
- Leipe C., Nakagawa T., Gotanda K. et al. Late Quaternary vegetation and climate dynamics at the northern limit of the East Asian summer monsoon and its regional and global-scale controls, *Quat. Science Reviews*, 2015, vol. 116, p. 57–17, DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.03.012.
- Li C., Wu Ya., Hou X. Holocene vegetation and climate in North-east China revealed from Jingbo Lake sediment, *Quat. Int.*, 2011, vol. 229, p. 67–73, DOI: 10.1016/j.quaint.2009.12.015.
- Ljungqvist F.C. A new reconstruction of temperature variability in the extratropical Northern Hemisphere during the last two millennia, *Geogr. Ann.*, 2010, vol. 92A, no. 3, p. 339–351.
- Lyashchevskaya M.S., Bazarova V.B., Makarova T.R. Development of the Environment of Southeastern Primorye during the Last 3300 Years, *Doklady Earth Sciences*, 2023, vol. 513, suppl. 1, p. S109–S120, DOI: 10.1134/S1028334X23602468.
- Mayewski P.A., Rohling E.E., Stager J.C. et al. Holocene climate variability, *Quat. Res.*, 2004, vol. 62, no. 3, p. 243–255, DOI: 10.1016/j.yqres.2004.07.001.
- Mikishin Yu.A., Petrenko T.I., Popov A.N., Orlova L.A. Paleogeografiya ozera Khanka v pozdnem golotsene [Paleogeography of the Khanka Lake in the Late Holocene], *Nauchnoe obozrenie*, 2007, no. 2, p. 7–13. (In Russian)
- Mikishin Yu.A., Petrenko T.I., Gvozdeva I.G. et al. Golotsen poberezh'ya Yugo-Zapadnogo Primor'ya [Holocene of the South-Western Primorye coast], *Nauchnoe obozrenie*, 2008, no. 1, p. 8–27. (In Russian)
- Mikishin Yu.A., Gvozdeva I.G. Paleosreda ostrova Russkii (Yuzhnoe Primor'e) v srednem-pozdnem golotsene [Mid to Late Holocene of the Russkyi Island (Southern Primorye)], *Fundamental'nye issledovaniya*, 2014, no. 3, p. 516–522. (In Russian)
- Mikishin Yu.A., Gvozdeva I.G. Pozdnii subatlantik Yuzhnogo Sakhalina [Late Subatlantic in the south of the Sakhalin Island], *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2016, no. 9, p. 137–142. (In Russian)
- Nagashima K., Tada R., Toyoda S. Westerly Jet – East Asian summer monsoon connection during the Holocene, *Geochim. Geophys. Geosyst.*, 2013, vol. 14, p. 5041–5053, DOI: 10.1002/2013GC004931.
- Nakamura J. Diagnostic characters of pollen grains of Japan, Part 2, *Special publications from Museum of Natural History*, 1980, vol. 12; includes 157 plates.
- Nazarova L.B., Diekmann B., Biskaborn B.K. et al. Reconstruction of environmental conditions in the eastern part of Primorsky Krai (Russian Far East) in the Late Holocene, *Contemporary problems of ecology*, 2021, vol. 14, no. 3, p. 218–230, DOI: 10.1134/S1995425521030094.
- Novenko E.Y., Zyuganova I.S., Olchev A.V. Application of the paleoanalog method for prediction of vegetation dynamics under climate changes, *Doklady Biological Sciences*, 2014, vol. 457, no. 1, p. 228–232. DOI: 10.1134/S0012496614040024.
- Rastitel'nyi i zhivotnyi mir Sikhote-Alinskogo zapovednika* [Flora and fauna of the Sikhote-Alin Nature Reserve], N.G. Vasil'ev, E.N. Matyushkin (eds.), Moscow, Nauka Publ., 1982, 304 p. (In Russian)
- Rastitel'nyi mir Sikhote-Alinskogo biosfernogo zapovednika: raznoobrazie, dinamika, monitoring* [Flora of the Sikhote-Alin Biosphere Reserve: diversity, dynamics, monitoring], A.V. Galanin et al. (eds.), Vladivostok, Biologo-pochvennyi institut DVO RAN Publ., 2000, 373 p. (In Russian)
- Razzhigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Panichev A.M., Kudryavtseva E.P., Kopoteva T.A., Klimin M.A., Arslanov K.A., Maksimov F.E., Petrov A.Y. Environmental changes recorded in deposits of the Izybrinye salontsi Lake, Sikhote-Alin, *Contemporary problems of ecology*, 2017, vol. 10, no. 4, p. 441–453. DOI: 10.1134/S1995425517040096.
- Razzhigaeva N.G., Ganzey L.A., Bazarova V.B. et al. Landscape response to the Medieval Warm Period in the South Russian Far East, *Quat. Int.*, 2019, vol. 519, p. 215–231, DOI: 10.1016/j.quaint.2018.12.006.
- Razzhigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A. et al. Razvitie Solontsovskikh ozer kak pokazatel' dinamiki uvlazhneniya v Tsentral'nom Sikhote-Aline v pozdnem golotsene [Development of Solontsovskie Lakes as indicator of humidity within Central Sikhote-Alin in the Late Holocene], *Geosistemy perekhodnykh zon*, 2021, vol. 5, no. 3, p. 287–304, DOI: 10.30730/gtr.2021.5.3.287-304. (In Russian)
- Razzhigaeva N., Ganzey L., Grebennikova T. et al. High-resolution lacustrine records of the Late Holocene hydroclimate of the Sikhote-Alin Mountains, Russian Far East, *Biology*, 2023, vol. 12, p. 913, DOI: 10.3390/biology12070913.
- Sakaguchi Y. Warm and cold stages in the past 7600 years in Japan and their global correlation – especially on climatic impacts to the global sea level changes and ancient Japanese history, *Bull. of the department. geography University of Tokyo*, 1983, vol. 15, p. 1–31.
- Sun X.J., Yuan S. *The pollen data and vegetation evolution during the 10,000 years in Jinchuan area, Jilin Province*, Quaternary Geology and Global Change, Part 2, Beijing: Science Press, 1990, p. 46–57 (in Chinese).
- Ukhvatkina O.N., Omelko A.M., Zhmerenetsky A.A., Petrenko T.Y. Autumn-winter minimum temperature changes in the southern Sikhote-Alin mountain range of northeastern Asia since 1529 AD, *Climate of the Past*, 2018, vol. 14, p. 57–71, DOI: 10.5194/cp-14-57-2018.
- Urusov V.M. *Genezis rastitel'nosti i ratsional'noe prirodopol'zovanie na Dal'nem Vostoke* [Genesis of vegetation and rational environmental management in the Far East], Vladivostok, DVO RAN SSSR Publ., 1988, 356 p. (In Russian)
- Usoskin I.G., Solanki S.K., Kovaltsov G.A. Grand minima and maxima of solar activity: new observational constraints, *A&A*, 2007, vol. 471, p. 301–309, DOI: 10.1051/0004-6361:20077704.
- Wang Y.J., Cheng H., Edwards R.L. et al. The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate, *Science*, 2005, vol. 308, p. 854–857, DOI: 10.1126/science.1106296.
- Yan J., Ge Q., Liu H. et al. Reconstruction of sub-decadal winter half-year temperature during 1651–2010 for the North China Plain using records of frost date, *Atmospheric and Climate Sciences*, 2014, vol. 4, no. 2, p. 211–218, DOI: 10.4236/acs.2014.42024.

Web source

Primopogoda [Primorye weather], URL: <http://www.Primopogoda.ru> (access date 15.07.2023).

Received 12.02.2024

Revised 16.04.2024

Accepted 26.06.2024