

УДК 551.8.89:551.312:556.55(571.513)

ВЕКОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КЛИМАТА СЕВЕРО-МИНУСИНСКОЙ КОТЛОВИНЫ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 3000 ЛЕТ: ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ НЕПЫЛЬЦЕВЫХ ПАЛИНОМОРФ ИЗ ОЗ. ШИРА[#]

© 2025 г. Е. В. Безрукова^{1, *}, С. А. Решетова¹, Н. В. Кулагина², А. А. Щетников², И. А. Филинов²

¹Институт геохимии имени А. П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

²Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

*E-mail: bezrukova@igc.irk.ru

Поступила в редакцию 24.02.2025 г.

После доработки 04.06.2025 г.

Принята к публикации 20.08.2025 г.

В статье представлены новые палинологические и геохимические результаты изучения тонкослоистых донных отложений глубоководного меромиктического озера Ши́ра, расположенного в Северо-Минусинской котловине на юге Сибири. Сведения об истории растительности, климата этого региона в позднем голоцене пока малочисленны. Новые данные позволяют частично восполнить пробел в современных знаниях. Представленная здесь запись непыльцевых палиноморф и геохимических показателей изменения природной среды охватывает последние 3000 лет со средним разрешением в 21 год. Новые результаты существенно дополняют имеющиеся региональные реконструкции климата и динамику гидрологического режима оз. Ши́ра и подтверждают предположение о том, что изменения гидрологии озера в позднем голоцене, главным образом, были связаны с крупномасштабными процессами атмосферной циркуляции, контролирующими водный баланс и температуру воздуха Минусинской котловины. Несмотря на длительную региональную историю мобильного скотоводства, непыльцевые палиноморфы и геохимические показатели, как и имеющиеся спорово-пыльцевые данные, предполагают начало активной антропогенной деятельности со второй половины XX в. В целом, результаты нашего исследования показывают важное значение непыльцевых палиноморф из ежегодно-слоистых озерных отложений для проведения высокоразрешающих реконструкций гидроклиматического режима озер и общей изменчивости влажности в степных регионах юга Сибири.

Ключевые слова: юг Сибири; оз. Ши́ра; донные отложения; непыльцевые палиноморфы; уровень озера; поздний голоцен

DOI: 10.7868/S2949179725040102

1. ВВЕДЕНИЕ

Поздний голоцен, рассматриваемый нами как интервал, охватывающий последние 4250 лет (Walker et al., 2019), – важный интервал времени в силу того, что именно он обеспечивает природно-климатическую основу для интерпретации растущих темпов и последствий антропогенной деятельности и изучения будущих изменений климата. Исследования различных климатических архивов и косвенных данных позволили получить информацию об особенностях природно-климатических

изменений в Средневековый теплый период, Малый ледниковый период и период современного потепления, но для лучшего понимания естественной изменчивости климата в позднем голоцене в масштабе десятилетие-столетие необходимы надежно датированные, высокоразрешающие записи природной среды (Schmidt, 2010). Такие записи хранятся, например, в ежегодно-слоистых отложениях озер – варвах (Zolitschka et al., 2015). Донные отложения оз. Ши́ра, расположенного в Северо-Минусинской котловине, как раз содержат ежегодно-слоистые осадки, позволяющие реконструировать изменения регионального климата с детальным разрешением. Котловина озера находится в регионе с семиаридным климатом, где атмосферная циркуляция определяется взаимодействием западного воздушного переноса и сибирского антициклона, что, в свою очередь, предопределяет быструю реакцию природной среды регио-

[#] Ссылка для цитирования: Безрукова Е. В., Решетова С. А., Кулагина Н. В., Щетников А. А., Филинов И. А. (2025) Вековая изменчивость климата Северо-Минусинской котловины за последние 3000 лет: палеоэкологический потенциал непыльцевых палиноморф из оз. Ши́ра. *Геоморфология и палеогеография*. Т. 56. № 4. С. 732–747. <https://doi.org/10.7868/S2949179725040102>

на на глобальные изменения климата. Результаты исследования современного состояния биоты, химического состава воды, гидрологического режима о. Ши́ра опубликованы во многих источниках (напр., Degermendzhy et al., 2010; Rogozin et al., 2017). Данные геохимических, палинологических, антропологических исследований донных отложений оз. Ши́ра легли в основу количественной реконструкции суммы атмосферных осадков (Kalugin et al., 2013), растительности и климата за последние 2450 лет со средним разрешением в 22 года (Hildebrandt et al., 2015), притока угольных частиц за последние 100 лет (Rogozin et al., 2023), динамики уровня воды в озере за последние ~100 лет (Zykov et al., 2012). Однако палеоэкологический потенциал непыльцевых палиноморф (НПП) из отложений оз. Ши́ра пока не был использован в полной мере. Между тем, НПП предоставляют важную дополнительную информацию об экологических и гидрологических реакциях экосистемы озера и его бассейна на изменение климата и антропогенную нагрузку.

Цель настоящей статьи – реконструкция гидроклиматических особенностей оз. Ши́ра и его бассейна за последние 3000 лет и выявление палеоэкологического потенциала непыльцевых палиноморф из его донных отложений.

2. РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Озеро Ши́ра (54°30'38" с. ш., 90°12'09" в. д.; 353 м над у. м.) расположено на севере Минусинской котловины (юг Сибири) (рис. 1). (Макунина, 2010) и частично относится к государственному природному заповеднику “Хакасский”. Длина озера составляет около 9.4 км, максимальная ширина около 5 км, площадь водного зеркала – 35.9 км². Глубина воды в центральной части достигает 24–25 м (Degermendzhy et al., 2010; Kalugin et al., 2013). Озеро бессточное, соленое, меромиктическое (Генова et al., 2010). С юга в оз. Ши́ра впадает единственная река Сон, обеспечивая почти половину притока пресной воды в озеро (Degermendzhy et al., 2010). Атмосферные осадки и подземные воды также являются важными источниками поступающей в озеро воды, причем, доля подземных вод в балансе озера оценивается от 9 до 17% (Kalugin et al., 2013). Соленость придонной воды (~18–19 г/л) и температура (~1–2°C) довольно постоянны (Rogozin et al., 2010). Это способствует возникновению меромиктических условий, т. е. квазистабильной стратификации и бескислородному состоянию нижней части водной толщи. Хотя иногда в озере возникали голомиктические условия (Kalugin et al., 2013; Rogozin et al., 2017). Преобладание бескислородных условий придонной воды, подавляющих

биотурбацию в сочетании со значительной глубиной создают условия для аккумуляции ежегодных слоистых отложений – варв (Zolitschka et al., 2015). Значительные изменения уровня озера (до 7 м) в недавнем прошлом (Rogozin et al., 2010) отражают изменчивый гидрологический баланс.

Положение Минусинской котловины в центре материка определяет общий континентальный умеренно холодный климат с резко выраженной изменчивостью сезонной и месячной температуры воздуха, с небольшим количеством осадков, сильными ветрами и низкой влажностью воздуха. Средняя температура января составляет –21.2°C, июля – +19.6°C. Среднегодовое количество осадков в степной зоне котловины – 317 мм, а в лесостепной достигает 421–494 мм. Максимальная мощность снежного покрова не превышает 10–18 см (Шашко, 1967). Озеро Ши́ра с ноября по май покрыто льдом.

В растительности древних речных долин Северо-Минусинской котловины преобладают степи и лесостепи. Ближе к горам сухие степи переходят в луговые. Лесостепной пояс из лиственницы *Larix sibirica*, березы *Betula pendula* и, в меньшей мере, из сосны *Pinus sylvestris* приурочен к области сопряжения котловины и горных сооружений и занимает высоты от 600 до 800 м над у. м. (Макунина, 2010). Горно-таежный пояс окружающих котловину хребтов образуют леса из березы, сосны, ели *Picea obovata*, пихты *Abies sibirica*, кедра сибирского *Pinus sibirica* (Маскаев, 1976).

В растительности вокруг оз. Ши́ра преобладают типчаковые, овсецовые сухие степи, кизильниковые луговые степи, разнотравно-злаковые луговые степи, где доминирует мятликово-полевицевая ассоциация с участием полыни холодной, остролодочника, осоки твердоватой (Макунина, 2010; Природный комплекс ..., 2011). По берегам озера в виде островов и лент растут лиственница, береза повислая, тополь, сосна, вяз приземистый, ивы. Озеро Ши́ра является также важным рекреационным объектом.

3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Керн Shira-2021-II-1 отобран в самой глубокой части озера (рис. 16) с глубины 25 м гравитационным керноотборным устройством UWITEC (Австрия) с ПВХ трубками диаметром 63 мм. Скважина вскрыла полный разрез озерных отложений до подстилающих элювиальных образований. Общая мощность разреза составила около 250 см. Здесь представлены результаты изучения верхней, 144-см части разреза. Возраст отложений в керне Shira-2021-II-1 определен на основании AMS ¹⁴C датирования (Bezrukova et al., 2024) и измерения

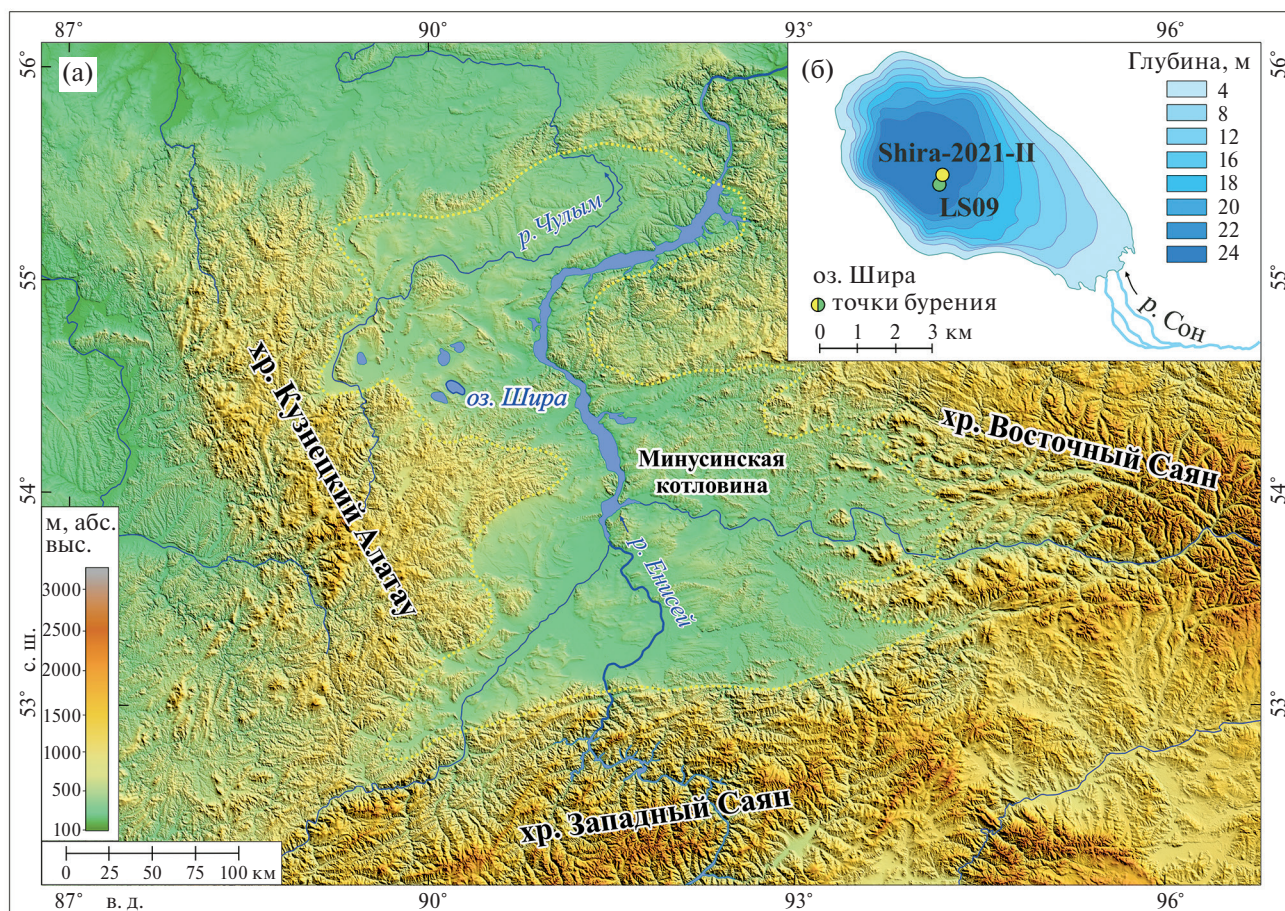


Рис. 1. Положение Минусинской котловины и оз. Шира на обзорной карте. Расположение объектов исследования: (а) – цифровая модель рельефа Минусинской котловины и окружающих ее горных сооружений с местоположением оз. Шира, построенная на основе SRTM 90-метрового разрешения, в. 4.1. (Jarvis et al., 2008) в программных пакетах Global Mapper 18 и QGIS2.18.25; (б) – батиметрическая схема котловины оз. Шира по (Bezrukova et al., 2025), с указанием точки бурения донных отложений.

Fig. 1. The Minusa Basin and Lake Shira shown on the overview map. Location of research objects: (a) – digital elevation model of the Minusinsk Basin and surrounding mountain structures with the location of Lake Shira, based on SRTM 90-metre resolution, v. 4.1. (Jarvis et al., 2008) in Global Mapper 18 and QGIS2.18.25 software packages; (b) – Bathymetric scheme of the Shira Lake basin (after Bezrukova et al., 2025), based on the authors' measurements with indication of the bottom sediment drilling point.

изотопов Cs-137 и Pb-210. Значение резервуарного эффекта ($P\bar{\epsilon}$) в 358 лет получено с применением полиномиальной регрессии по значениям ^{14}C датировок в стратиграфическом порядке с использованием “метода перехвата” (Zhang et al., 2016). Возрастная модель построена с применением пакета Bacon в статистической среде R (Blaauw and Christen 2011). Далее в тексте все значения возраста приведены в калиброванных годах. Лабораторная подготовка образцов каждого сантиметра из керна для палинологического анализа проводилась по методу (Berglund and Ralska-Jasiewiczowa, 1986). Образцы не подвергались ацетализу. Для расчета концентрации палиноморф (Stockmarr,

1971) в каждую пробу добавляли по одной таблетке с калиброванным маркером (споры *Lycopodium clavatum*, № партии 483216). Хорошая сохранность пыльцы и спор позволила насчитать в образцах от 700 до 1400 наземных пыльцевых зерен (Bezrukova et al., 2025). Кроме пыльцы и спор сосудистых криптогамных растений на слайдах были подсчитаны и некоторые непыльцевые палиноморфы (далее в тексте, НПП), включая группы клеток и колонии зеленых водорослей NN-151 *Botryococcus braunii* (от 20 до 1900 шт.), клетки десмидиевых водорослей рода *Staurastrum* (0–56 шт.) и *Cosmarium* (0–15 шт.), фрагменты мелких ветвистых ракообразных *Cladocera* (0–99 шт.), споры грибов

рода UY-121 *Glomus* и HdV-1103 *Glomus* (0–8 шт.) и UY_104 *Coniochaeta* (0–34 шт.). Процентное содержание перечисленных НПП было рассчитано от общей суммы всех подсчитанных пыльцевых и непыльцевых палиноморф в соответствующей пробе. Для идентификации спор грибов *Glomus*, *Coniochaeta*, водорослей *Botryococcus* использованы фотографии и статьи из Non-Pollen Palynomorph Image Database (NON-POLLEN PALYNOMORPHS. Дата обращения 10.12.2024 г.). Клетки водорослей *Staurastrum* и *Cosmarium* определялись с использованием фотографий (McCarthy et al., 2018). Фрагменты *Cladocera* определены Л. А. Фроловой. Открытость ландшафта оценивалась как отношение суммы пыльцы древесных растений AP к сумме пыльцы недревесных NAP. Отношение Ag/Ch мы использовали как показатель эффективного увлажнения на региональном уровне, особенно там, где среднегодовое количество атмосферных осадков не превышает 500 мм (Qin et al., 2015). Представленные фотографии НПП из отложений оз. Ши́ра получены С. А. Решетовой с использованием микроскопа Carl Zeiss AxioLab, оснащенного цифровой камерой ADF PRO 08.

Содержания основных окислов и микроэлементов (Sr, Zr) определены для каждого сантиметра этого же керна согласно методике (Amosova et al., 2019). Для устранения влияния минералогического и гранулометрического составов образцы гомогенизировали сплавлением с метабора́том лития в платиновых тиглях в электропечи TheOX (Claisse, Канада) при температуре 1050°C. После сплавления формировался диск диаметром 10–12 мм. Измерения выполнены на волноводисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре S8 Tiger (Bruker AXS, Германия). Для построения градуировочных характеристик использован набор стандартных образцов (СО) горных пород от ультраосновного до кислого состава Геологических служб США, Японии, Монголии и ИГХ СО РАН. Значения потерь при прокаливании (ППП) определялись гравиметрическим методом (Heiri et al., 2001).

Вклад терригенного кальция вслед за (Maltsev et al. 2020) оценивался, принимая Al в качестве опорного элемента, содержание которого в верхней континентальной коре составляет 7.74%, а Ca – 2.94%, (Wedepohl, 1995), согласно формуле:

$$Ca_{\text{терр.}} = (Al_{\text{обр.}}/Al_{\text{в.к.}}) \times Ca_{\text{в.к.}}$$

где $Al_{\text{обр.}}$ – содержание Al в отдельном образце отложений из оз. Ши́ра, $Al_{\text{в.к.}}$ – содержание Al в верхней континентальной коре, $Ca_{\text{в.к.}}$ – содержание Ca в верхней континентальной коре. Опубликованные ранее результаты изучения спорово-пыльцевых спектров в отложениях этого же керна (Bezrukova

et al., 2024), подсчета частиц углей крупнее 100 мк, тоже учтены в настоящем исследовании для интерпретации изменений природной среды.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Отложения в керне представлены ленточно-слоистой темно-серой, почти черной толщей, при окислении приобретающей пестроцветный характер. Темно-коричневые, тонкослоистые озерные глины, обогащенные органическим веществом, формируют слои на глубине 0–8, 10–32, 38–67, 79–87, 105–133 см от поверхности керна. Отложения на глубине 8–10, 32–38, 67–79, 92–105 и 133–144 см представлены тонкослоистыми, белесыми карбонатными глинами, почти лишенными органики (рис. 2). В целом, в литологическом составе отложений господствует глинистая фракция, но в верхних 5 см значительно возрастает доля частиц песчаной и илистой размерностей (Bezrukova et al., 2024). Модель глубина–возраст для отложений керна показала, что верхние 144 см отложений накапливались на протяжении последних 3000 лет. Почти линейная зависимость возраста от глубины свидетельствует о непрерывном осадконакоплении (рис. 3).

Относительное обилие зеленых водорослей *Botryococcus braunii* в донных отложениях оз. Ши́ра существенно изменяется, показывая глубокие минимумы 2850–2800, 2000–1950, 1330–1270, 700–510 и 120–70 л. н. (рис. 2, серые горизонтальные полосы), когда их обилие составляло 3–8%. В остальные интервалы времени эти значения *Botryococcus* варьировали от 12 до 73%. Клетки десмидиевых водорослей *Staurastrum* почти не встречаются в интервале 3000–80 л. н., но в отложениях последних 80 лет их обилие изменяется от 0.3 до 7.6% (рис. 2).

Низкие значения обилия клеток десмидиевых водорослей *Cosmarium* обнаружены образцах, возраст которых составляет около 230 и 150 л. н., а в интервале 80–40 л. н. их обилие изменяется от 0.4 до 1.1%. Фрагменты ветвистых ракообразных *Cladocera* обнаружены почти во всех образцах, однако, их максимальные значения приурочены к интервалам 2840–2780, 2560–2460, 2000–1900, 700–600 и 120–180 л. н. Споры грибов *Glomus* имеют ограниченную приуроченность к интервалам, сформированным около 820–680 л. н. и в последние 150 лет. В то время как споры грибов *Coniochaetae*, встречаясь постоянно, имеют повышенные значения в интервалах 2570–2550, 2100–2000, 1000–950, 680–580 л. н. и в последние 120 лет.

На рис. 2 приведены избранные геохимические показатели изменения лимносистемы оз. Ши́ра и ее водосбора. Эти показатели являются важными для понимания динамики изменений размера

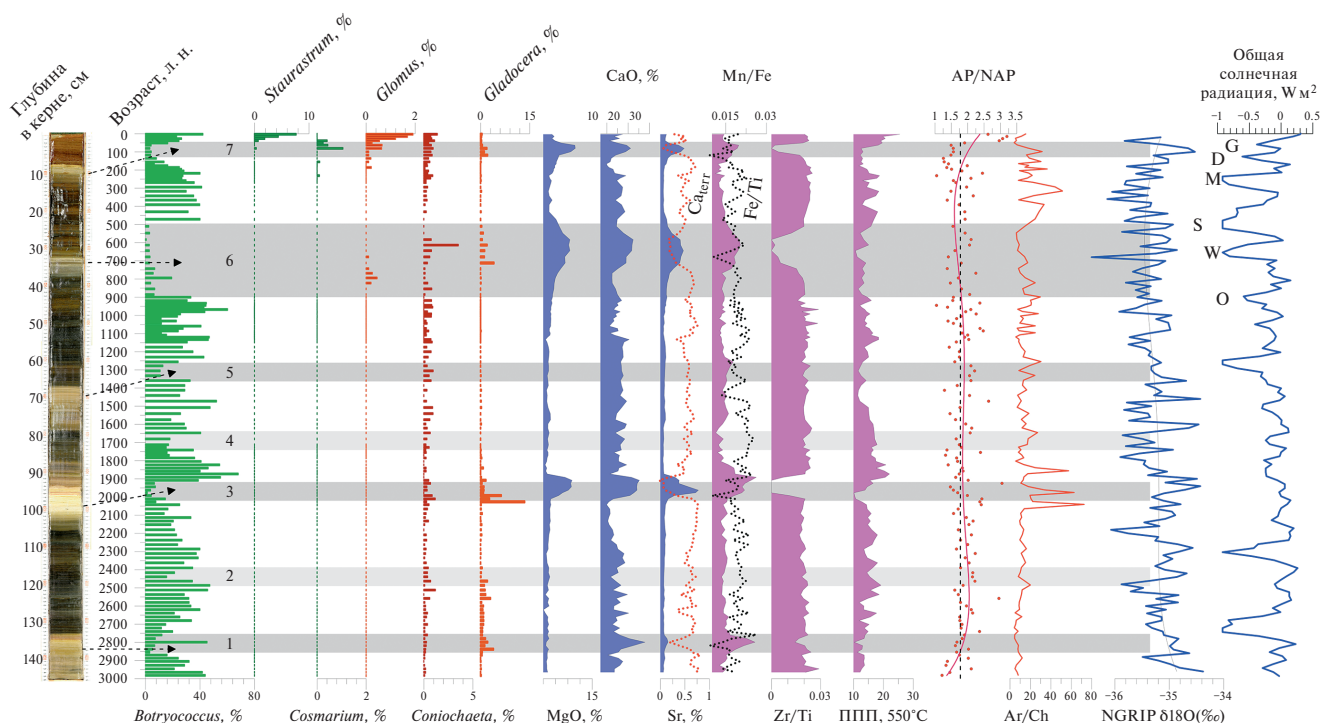


Рис. 2. Фотографическое изображение ядра Shira-2021-II-1 и основные показатели изменения природной среды: *Botryococcus*, *Staurastrum*, *Cosmarium*, *Cladocera* – показатели динамики водной экосистемы оз. Ширы; *Glomus*, *Coniochaeta* – показатели эрозии почв; геохимические элементы и отношения – показатели изменений в водной системе и водосборном бассейне озера, красная пунктирная линия в шкале Sr, % означает содержание терригенного кальция, черная пунктирная линия в шкале Mn/Fe показывает вариации Fe/Ti; отношение AP/NAP – изменений открытости ландшафта; Ar/Ch – изменение региональной растительности; NGRIP $\delta^{18}\text{O}$ и общая солнечная радиация – показатели изменения глобального климата за последние 2900 лет. Серые горизонтальные полосы – интервалы аккумуляции преимущественно карбонатных “белесых” илов во время пониженных уровней воды в озере.

Fig. 2. Photograph of the Shira-2021-II-1 core sediments and selected indicators of changes in the natural environment: *Botryococcus*, *Staurastrum*, *Cosmarium*, *Cladocera* – considered as an indicators of the dynamics of the Shira Lake aquatic ecosystem; *Glomus*, *Coniochaeta* – as an indicators of catchment soil erosion; geochemical elements and ratios – indicators of changes in the aquatic system and catchment area of the lake; red dashed line in Sr, % column means terrigenous calcium content, black dashed line in the Mn/Fe scale shows the Fe/Ti variations; Ar/Ch – regional vegetation change; AP/NAP ratio – changes in regional landscape openness; NGRIP $\delta^{18}\text{O}$ and Total solar irradiance – indicators of global climate change over the last 2900 years. Gray horizontal bars – intervals of predominantly carbonate “whitish” silts accumulation during low lake water levels.

минерального зерна/поступления грубозернистого материала, вариаций карбонатного осадконакопления, изменения редокс-условий на границе водадно. Из рисунка видны резкие повышения значений MgO, CaO, Sr и отношения Mn/Fe в интервалы аккумуляции белесых глин, в то время как содержание общего органического вещества (ППП при 550°C), терригенного карбоната Ca_{terr} и отношения Zr/Ti в эти интервалы времени резко снижаются (рис. 2). Значения AP/NAP изменяются незначительно.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее было показано, что пыльцевые комплексы из оз. Ширы отражают вариации преимущественно региональной растительности (Hildebrandt

et al., 2015; Bezrukova et al., 2024–2025). К тому же активная эоловая деятельность в котловине и ее горном окружении также позволяет предположить, что пыльцевые комплексы являются смешанным сигналом региональной растительности. Полученная нами новая комплексная запись из оз. Ширы продлевает имеющуюся палинологическую запись из ядра LS09 из отложений этого же озера (Hildebrandt et al., 2015) на 530 лет, позволяя реконструировать природно-климатические изменения на севере Минусинской котловины за последние 3000 лет с разрешением в 21 год. Реконструкции показали существование относительно влажного регионального климата 3000–2650 л. н. Начиная с 2650 л. н. отмечается постепенная аридизация климата, прерывавшаяся интервалами более влаж-

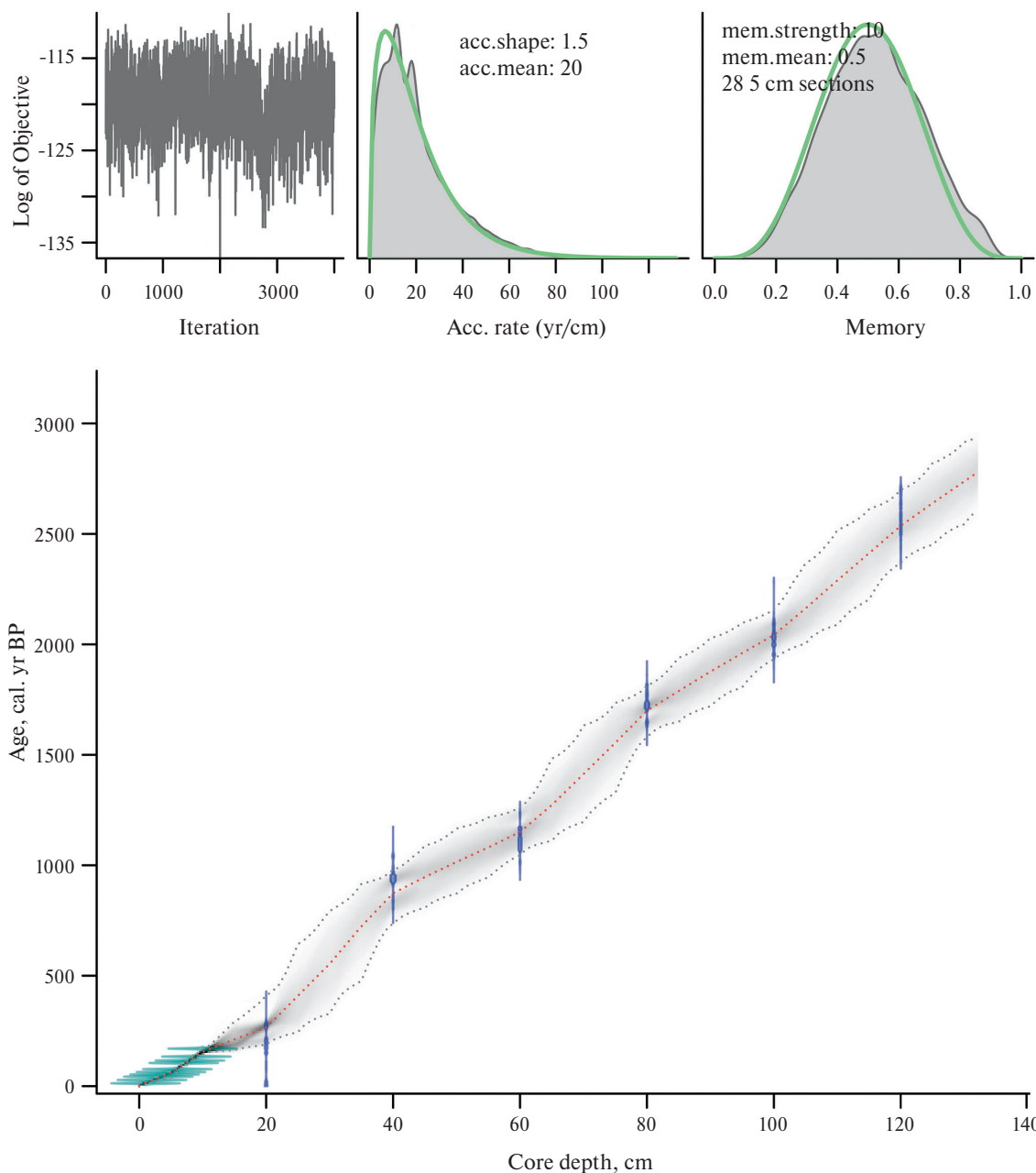
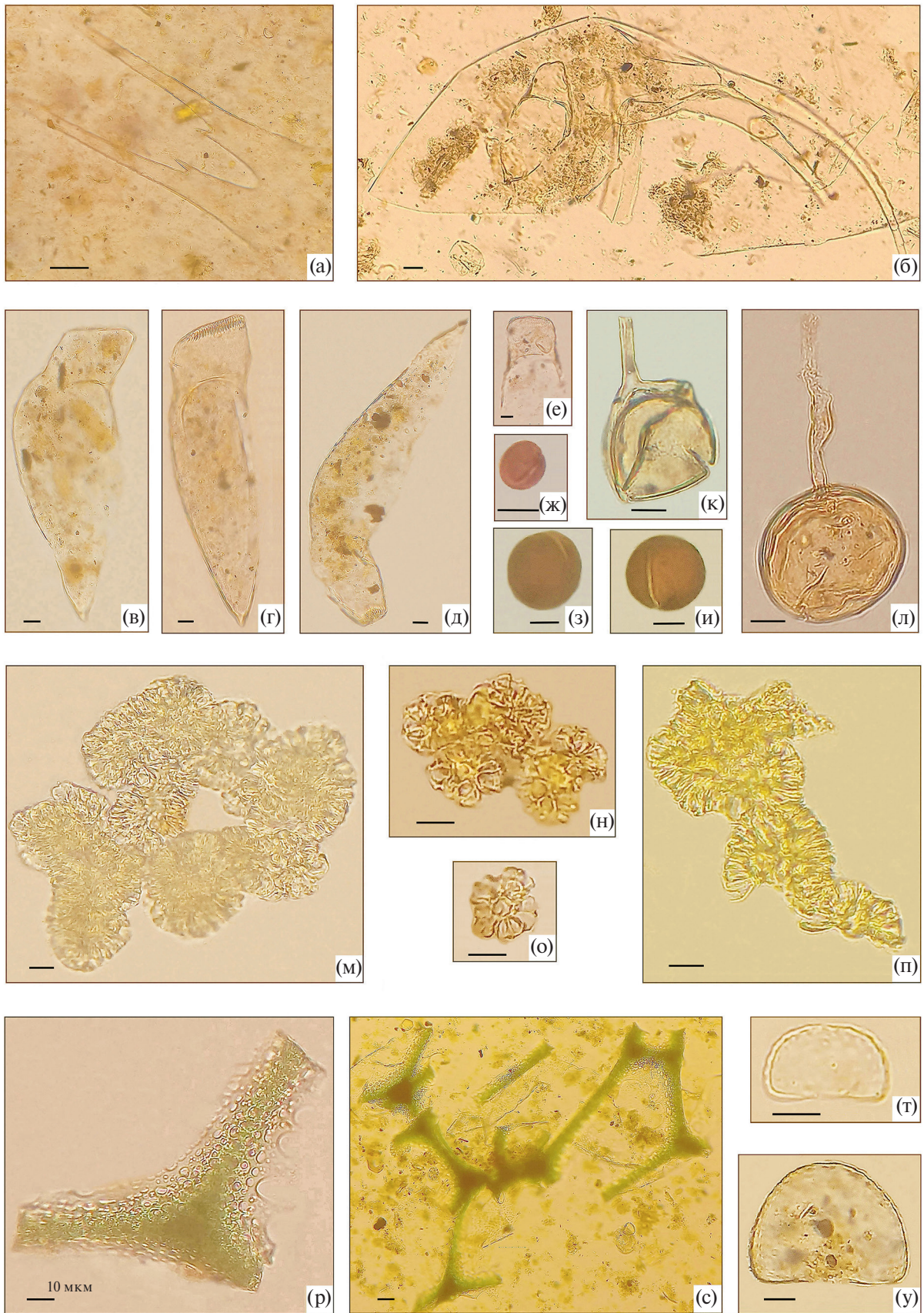


Рис. 3. График отношения возраст–глубина, основанный на профиле ^{210}Pb верхнего слоя отложений в керне Shira-2021-II-1 и АМС ^{14}C датах из этого же керна. Диапазон двух пунктирных фиолетовых линий показывает 95% доверительные интервалы, красная пунктирная линия соответствует “лучшей” модели, основанной на средневзвешенном возрасте для каждого сантиметра в керне.

Fig. 3. Plot of the age–depth relationship based on the ^{210}Pb profile of the upper section in Shira-2021-II-1 core and AMS ^{14}C dates from the same core. The range of the two dashed purple lines shows 95% confidence intervals, the red dashed line corresponds to the “best” model based on the weighted average age for each cm in the core.

ного климата. В целом, климат Минусинской котловины оставался благоприятным для господства степных и лугово-степных группировок вокруг оз. Ши́ра. Реконструкции также показали, что изменения растительности в Северо-Минусинской

котловине в позднем голоцене были обусловлены, главным образом, крупномасштабными процессами воздушной циркуляции, менявшими баланс тепла и влаги в регионе. В пыльцевых записях не было найдено четких показателей антропогенного



влияния на растительность. Только заметное повышение содержания пыльцы березы в последние примерно 50 лет может указывать на проведение озеленения вокруг курортных зон (Bezrukova et al., 2024–2025).

Новая, дополнительная и очень важная информация о динамике водной системы самого озера, его водосборного бассейна и региональной природной среды содержится в комплексах НПП и геохимических данных из донных отложений оз. Ши́ра, расширяя наше представление о палеогеографических условиях изучаемого региона. На рис. 4 показаны фотографии наиболее часто встречающихся на пыльцевых слайдах НПП.

Так, водоросли *Botryococcus* являются одними из наиболее распространенных палиноморф в лагунных и озерных отложениях (Tyson, 1995). Представители *Botryococcus* служат прекрасными экологическими маркерами и чаще, чем другие зеленые водоросли, характерны для солоноватоводных бассейнов. Они обычно обильны в мелководных бассейнах в регионах с низким количеством атмосферных осадков и ярко выраженной сезонностью климата (Guy-Ohlson, 1992).

Харофитовые водоросли рода *Staurastrum* предпочитают слабокислые олиго-мезотрофные воды, чаще являясь бентосными или перифитонными формами, встречаясь в местообитаниях с разным уровнем трофности (Лукницкая, 2020; Coesel, Meesters, 2013). Они хорошо адаптируются также к частым изменениям физической среды, таким как низкое освещение и температуры, высокое содержание питательных веществ (Tsarenko et al., 2019). Вместе с другими организмами перифитонные формы могут вызывать обрастание на лодках и других предметах, долго находящихся в воде.

Водоросли *Cosmarium* чувствительны к условиям среды. Большинство десмидиевых предпочитают кислые и слабокислые воды, с низкой минерализацией, населяют обычно олиго- и мезотрофные водоемы (Анисимова, 2017). Низкая освещенность, проточность воды ограничивает их состав и численность.

Ископаемые споры грибов, часто встречающиеся на пыльцевых слайдах, являются важными показателями палеоэкологических изменений, хотя

их потенциал еще не полностью изучен (van Geel et al., 2011). Среди спор грибов, обнаруженных в позднеголоценовых отложениях оз. Ши́ра, чаще других встречались споры *Glomus* и *Coniochaeta*. В болотных экосистемах споры *Glomus* могут рассматриваться как показатель пониженного уровня грунтовых вод (Ejarque et al., 2009). Однако в озерных отложениях присутствие повышенных значений *Glomus* может быть следствием усиливающейся эрозии почв (Kořaczek et al., 2013), поскольку грибы *Glomus* растут на корнях растений, на разлагающейся древесине, лесном опаде, лесной подстилке. При усилении эрозии в водосборном бассейне в озеро поступает больший объем почвенных частиц со спорами грибов, поэтому в озерных отложениях *Glomus* может служить индикатором усиления эрозии почв. Грибы рода *Coniochaeta* рассматриваются, главным образом, как копротрофные (Richardson, 2006).

Остатки *Cladocera* стали все чаще использоваться в качестве биоиндикаторов в палеоэкологических исследованиях и реконструкциях абиотических условий прошлого (Kamenik et al., 2007; Фролова, 2011). Ранее проведенные исследования показали, что сообщества микроракообразных в голоценовых отложениях оз. Ши́ра очень бедные (Нигматуллин и др., 2022). Авторы полагают, что остатки кладоцер приурочены к осадочным уровням, сформировавшимся в интервалы повышенных уровней озера и некоторого опреснения его воды. Остатки *Cladocera*, найденные нами на пыльцевых слайдах, представлены, в основном, элементами панциря, мандибулами (рис. 4).

Химические элементы, измеренные с помощью рентгенофлуоресцентного анализа, и их соотношения демонстрируют своеобразные изменения во времени, связанные с процессами, происходящими в озере и его бассейне, предоставляя дополнительную важную палеоэкологическую информацию. Так, циркон (Zr), будучи устойчив к химическому выветриванию, является типичным крупнозернистым компонентом в осадочных породах. В результате цирконом, как правило, обогащается выдуваемая ветром фракция осадков (Croudace, Rothwell, 2015). Титан (Ti) встречается в широком диапазоне относительно нерастворимых минеральных фаз,



Рис. 4. Фотографии непollen палиноморф, наиболее часто встречающихся в отложениях керна Shira-2021-II-1. (а) – антенны *Cladocera*; (б) – тело *Cladocera* (aff. *Bosmina*); (в) – мандибула *Bosmina*; (г–е) – мандибула *Daphnia*; (ж–и) – UY-104 *Coniochaetae*; (к) – UY-121 *Glomus*; (л) – HdV-1103 *Glomus*; (м–п) – NN-151 *Botryococcus braunii*; (р–с) – *Staurastrum*; (т) – *Cosmarium formosulum*; (у) – *C. franstonii*.

Fig. 4. Photographs of non-pollen palynomorphs most frequently occurring in Shira-2021-II-1 core: (a) – antennas of *Cladocera*; (б) – body of *Cladocera* (aff. *Bosmina*); (в) – *Bosmina* mandible; (г–е) – *Daphnia* mandible; (ж–и) – UY-104 *Coniochaetae*; (к) – UY-121 *Glomus*; (л) – HdV-1103 *Glomus*; (м–п) – NN-151 *Botryococcus braunii*; (р–с) – *Staurastrum*; (т) – *Cosmarium formosulum*; (у) – *C. franstonii*.

поэтому используется в качестве индикатора эолового (Yancheva et al., 2007) или флювиального обломочного материала в озерных системах (Minyuk et al. 2013). Низкие значения Mn/Fe могут соотноситься с высоким уровнем озера со стратифицированной водной толщей и придонной аноксией, которые способствуют восстановительному растворению Mn-оксидов в водной толще и поверхностных осадках и образованию аутигенных Fe-сульфидов, что приводит к соответствующим высоким соотношениям Fe/Ti (Naeher et al., 2013). Связанные с карбонатом элементы (Ca, Sr и Mg) обычно отражают общее действие биохимических процессов, например, фотосинтеза водорослей, и гидрологических изменений, например, осадков, испарения и стока (Chen et al., 2021). Однако Ca может иметь и аллохтонное происхождение — быть привнесенным с терригенной фракцией с водосборного бассейна (Maltsev et al., 2020).

Результаты анализа показывают значительное изменение относительного обилия колоний водорослей *Botryococcus*, характеризующих водную среду обитания. Обилие *Botryococcus* в записи Shira-2021-II-1 имеет семь минимумов, проявившихся около 2850–2800, 2450–2400, 2000–1950, 1700–1730, 1330–1270, 870–510 и 120–70 л. н. (рис. 2). Эти интервалы практически совпадают со временем пониженного уровня озера и голомиктических условий, которые наступали в холодные и засушливые периоды (Kalugin et al., 2013). В работе (Hildebrandt et al., 2015) указано, что сопоставимая связь снижения обилия *Botryococcus* и понижения уровня озера в относительно сухом климате обнаружена в осадочной летописи из солоноватоводного озера Цо Кар в индийских Гималаях. Предполагается, что это происходило из-за возможного повышения солености воды в засушливые периоды, что негативно влияло на рост *Botryococcus*. Современные исследования показали, что подъем уровня в оз. Ши́ра в 2003–2007 гг. происходил за счет поверхностного притока пресной воды (Rogozin et al., 2020), что возможно при повышении уровня атмосферных осадков в регионе. Тогда следует, что в интервалы минимумов *Botryococcus* в Минусинской котловине наступали холодные и/или особенно аридные условия при снижении поверхностного стока воды в озеро, приводившие к низкому уровню воды и ее повышенной солености. Фотография керна (рис. 2) показывает, что эти интервалы, в основном, соответствуют времени аккумуляции в оз. Ши́ра белесых, почти лишенных органического вещества слоев (Kalugin et al., 2013), сильно отличающихся в разрезе по цвету от почти черных глинисто-карбонатных слоев, богатых органикой (рис. 2). Результаты РФА свидетельствуют об особенных условиях в бассей-

не и самой водной системе озера в интервалы 1–7. Эти условия характеризовались повышенной аккумуляцией аутигенных и, соответственно, низким поступлением терригенных карбонатов. Высокие значения Mn/Fe предполагают низкий уровень воды, нарушение стратификации водной толщи, насыщенный кислородом придонный слой воды и переход водной системы оз. Ши́ра в голомиктическое состояние. Низкие значения Zr/Ti, вероятно, указывают на изменение размерности минерального зерна и означают ослабление интенсивности флювиального стока/усиление эолового переноса, снижение гидродинамики р. Сон, что приводило к поступлению в озеро преимущественно мелкозернистой минеральной фракции. Нельзя исключать и того, что как раз повышенное содержание мелкой фракции в воде могло также быть важным фактором, лимитирующим обилие *Botryococcus* из-за снижения освещенности воды/фотосинтеза для водорослей.

В реконструированном облике растительности севера Минусинской котловины на протяжении последних 3000 лет не происходило глубоких изменений, которые указывали бы на резкие вариации регионального климата, соответствовавших минимумам *Botryococcus* (Hildebrandt et al., 2015; Bezrukova et al., 2024–2025). Однако слабые пики пыльцы растений водно-болотных обитаний и минимумы отношения пыльцы *Artemisia/Chenopodiaceae* около 2000, 1300, 850, 400–250, 100 и 20 л. н. (Ar/Ch, рис. 2) частично поддерживают вывод о более аридном климате/низком уровне озерной воды в эти интервалы.

Интересно, что если продолжительность минимумов *Botryococcus* 1–5 и 7 составляла 30–50 лет, то минимум 6 длился около 350 лет. Для понимания возможных причин вариаций обилия *Botryococcus* мы провели сравнение времени проявления его минимумов с изменениями глобального климата (рис. 2). Приведенная изотопно-кислородная шкала из ледовых кернов Гренландии NGRIP $\delta^{18}\text{O}$ обычно рассматривается как высокоразрешающая летопись температуры воздуха Северного полушария (Seierstad et al. 2014), а шкала Общая солнечная радиация (Steinhilber et al., 2012) демонстрирует поступление солнечной радиации за последние 3000 лет и время известных ее гранд-минимумов. Результаты показали, что минимумы *Botryococcus* 1, 3, 5–7 в пределах неопределенностей возрастных моделей соотносятся с кратковременными похолоданиями климата в североатлантическом регионе, известными как события Бонда (Bond et al., 2001). Кроме этого, минимум 6 начинается во время солнечного гранд-минимума Оорта, завершается в гранд-минимум Шперера (рис. 2) и практически

полностью приходится на Малый ледниковый период. Менее глубокие минимумы *Botryococcus* 2 и 4 могут быть соотнесены с небольшими похолоданиями, выраженными в изотопно-кислородной шкале NGRIP $\delta^{18}\text{O}$. При этом минимум 7, с одной стороны, приходится на солнечный гранд-минимум Далтона и достигает пессимума при повышении температуры воздуха в североатлантическом регионе (шкала NGRIP $\delta^{18}\text{O}$, рис. 2). Следует помнить, что наши результаты предполагают аридный климат на севере Минусинской котловины в Малый ледниковый период в интервале 870–510 л. н., приводивший к значительному сокращению объема поступавшей в оз. Ширы воды и снижению уровня озера. Реконструкции климата этого времени по результатам анализа пыльцы и спор, хирономид, диатомовых водорослей для юго-восточного Алтая, юго-западной части Тувы, Чуйской котловины также предполагают, в целом, аридный климат последнего тысячелетия (Nerov, et al., 2020). В то же время для некоторых районов Минусинской котловины существуют реконструкции, указывающие на холодный и влажный климат Малого ледникового периода, в течение которого в горах Алтая продвигались ледники стадии Актру (Agatova et al., 2012). Вероятно, что окружающие Минусинскую котловину горные хребты препятствовали проникновению в котловину влагонесущих воздушных масс, поддерживая аридный климат самой котловины. Впрочем, асинхронное и изменчивое поведение влажности климата во время Малого ледникового периода (700–180 л. н.) на территории внеаридной Центральной Азии уже подчеркивалось (Chen et al., 2015).

Максимум обилия водорослей *Cosmarium* 80–60 л. н., предпочитающих кислые и слабокислые воды с пониженной минерализацией, хорошей освещенностью (Coesel, Meesters, 2013; Şahin, 2021), мог соответствовать переходу системы оз. Ширы к меромиктическому состоянию. Следовавший сразу за ним максимум обилия водорослей *Staurastrum*, вероятно, был следствием повышения эвтрофности в оз. Ширы из-за высокой антропогенной нагрузки на его экосистему. Последнее находит подтверждение и в пыльцевой записи из оз. Ширы (Hildebrandt et al., 2015; Bezrukova et al., 2024), которая показывает резкое повышение роли березы из-за преобразования местных ландшафтов – строительства курортных зон вокруг озера. Однако причины такого ограниченного во времени проявления водорослей *Staurastrum* и *Cosmarium* остаются не до конца понятными.

Максимум относительного обилия спор грибов *Glomus*, особенно в последние 40–20 лет, мог быть следствием усиливающейся эрозии почв из-за высокой антропогенной нагрузки на прибрежную

зону озера. Небольшой максимум спор *Glomus* около 770 л. н. проявился после завершения длительного периода высокого притока в оз. Ширу микрочастиц углей (Bezrukova et al., 2024) и, возможно, также служит показателем повышенной эрозии почв после пожаров. Почти постоянное нахождение в отложениях оз. Ширы спор копротрофных грибов *Coniochaeta* не имеет четкой приуроченности к интервалам резких изменений в литологии/состоянии водной системы озера и может служить показателем присутствия вблизи озера травоядных животных. Последнее не удивительно для региона с богатой археологической историей. Причем верхний максимум спор *Coniochaeta* соответствует последним примерно 120 годам, когда, с приходом русских, наступило особенно интенсивное освоение земельных угодий, развитие животноводства.

Особенности встречаемости остатков *Cladocera* в отложениях керны Shira-2021-II-1 предполагают, что они предпочитают условия, возникавшие в оз. Ширы при переходе от меромиктического к голомиктическому состоянию, когда вода в озере перемешивалась, насыщаясь кислородом.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реконструированные на основе состава непальцевых палиноморф и геохимических показателей изменения природной среды, климата, состояния водной системы оз. Ширы за последние 3000 лет предполагают существование на севере Минусинской котловины континентального и аридного климата, прерывавшихся интервалами повышенной влажности. Многократные интервалы аридного климата, длившиеся от нескольких десятилетий до столетий, приводили к значительному снижению уровня воды в оз. Ширы, нарушению стратификации водной толщи, исчезновению аноксии придонной воды и переходу экосистемы озера в голомиктическое состояние. Особенно глубокие изменения озерной экосистемы под влиянием аридного климата имели место около 2000–1950, 870–510 и 120–70 л. н. Сравнение реконструированных палеоэкологических событий на севере Минусинской котловины с записями глобального климата позднего голоцена предполагает преимущественно глобальные причины региональных изменений. Вероятно, чередование аридных и относительно влажных интервалов в регионе могло быть главным, но не всегда линейным ответом на снижение инсоляции и связанные с ним изменения в атмосферной циркуляции (например, взаимодействие западного переноса с Сибирским максимумом), что оказывало глубокое воздействие на гидрологию, экологию и человеческую цивилизацию в Минусинской котловине. Наши исследования подчеркивают важ-

ный потенциал НПП в реконструкции климатических, гидрологических и экологических условий прошлого для понимания развития экосистем и их возможной реакции на климатические изменения ближайшего будущего.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-17-00067 (бурение, опробование керна, анализ НПП) и частично соответствуют государственному заданию ИГХ СО РАН № 0284-2021-0003.

Авторы глубоко признательны П. П. Летуновой за помощь в определении НПП, Л. А. Фроловой – за идентификацию остатков кладоцер, Е. В. Керберу за работу с возрастной моделью, М. А. Крайнова за помощь в экспедиционных исследованиях. Особенная благодарность уважаемым рецензентам за полезные комментарии и предложения, направленные на улучшение статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агатова А.Р., Назаров А.Н., Непоп Р.К., Орлова Л.А. (2012) Радиоуглеродная хронология гляциальных и климатических событий голоцена юго-восточного Алтая (Центральная Азия). *Геология и геофизика*. Т. 53. № 6. С. 712–737.
- Анисимова О.В. (2017) Десмидиевые водоросли сфагновых болот Московской области: видовое разнообразие и экологическая приуроченность. *Труды Института биологии внутренних вод имени И.Д. Папанина РАН*. Вып. 79 (82). С. 10–18.
- Безрукова Е.В., Решетова С.А., Кулагина Н.В. и др. (2024) Растительность и климат на севере Минусинской котловины в позднем голоцене с декадным разрешением: запись из озера Ши́ра. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. Т. 518. № 2. С. 359–365. <https://doi.org/10.31857/S2686739724100181>
- Лукницкая А.Ф. (2020) Конъюгаты (Charophyta, Zygnematorphyceae) в окрестностях станций Прогресс и Беллинсгаузен (Антарктика). *Ботанический журнал*. Т. 105. № 10. С. 950–956. <https://doi.org/10.31857/s0006813620100051>
- Макунина Н.И. (2010) Структура растительности степного и лесостепного высотных поясов Хакасского и Тувинского горных бассейнов. *Растительный мир Азиатской России*. № 2. С. 50–57.
- Мальцев А.Е., Леонова Г.А., Бобров В.А. и др. (2020) Геохимия карбонатных осадков малых озер юга Западной Сибири на примере голоценового разреза оз. Иткуль. *Геология и геофизика*. Т. 61. № 3. С. 378–399. <https://doi.org/10.15372/GiG2019081>
- Маскаев Ю.М. (1967) Леса. В сб.: *Растительный покров Хакасии*. Новосибирск: Наука. С. 153–216.
- Нигматуллин Н.М., Нигаматзянова Г.Р., Валиева Э.А. и др. (2022) Палеолимнологические исследования меромиктического озера Ши́ра (Республика Хакасия) на основе анализа субфоссильных Cladocera. В сб.: *Динамика экосистем в голоцене. Сборник статей по материалам всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 17–21 октября 2022 года*. СПб: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена. С. 114–118.
- Природный комплекс и биоразнообразие участка “Озеро Ши́ра” заповедника “Хакасский” (2011) Под ред. В.В. Непомнящего. Абакан: Хакасское книжное издательство. 420 с.
- Рогозин Д.Ю., Бурдин Л.А., Болобанщикова Г.Н., Дегерменджи А.Г. (2023) Беспрецедентное увеличение количества углистых частиц в донных отложениях озер Северо-Минусинской котловины (юг Сибири) в современный период как возможное свидетельство антропогенного влияния. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. Т. 511. № 2. С. 280–286. <https://doi.org/10.31857/S2686739723600534>
- Рогозин Д.Ю., Зыков В.В., Бульхин А.О., Дегерменджи А.Г. (2020) Океан в донных отложениях как палеоиндикатор изменений уровня соленого стратифицированного озера. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. Т. 493. № 1. Р. 98–102. <https://doi.org/10.31857/S2686739720070166>
- Фролова Л.А. (2011) Ветвистоусые ракообразные (Cladocera LATREILLE, 1829, Branchiopoda, Crustacea) в палеоэкологических исследованиях. В сб.: *Методические подходы к использованию биологических индикаторов в палеоэкологии*. Казань: Казанский ун-т. С. 52–87.
- Шашко Д.И. (1967) Агроклиматическое районирование СССР. М.: Колос. 335 с.
- Amosova A.A., Chubarov V.M., Pashkova G.V. et al. (2019) Wavelength dispersive X-ray fluorescence determination of major oxides in bottom and peat sediments for paleoclimatic studies. *Appl. Radiat. Isot.* Vol. 144. P. 118–123. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.11.004>
- Berglund B.E., Ralska-Jasiewiczowa M. (1986) Pollen Analysis and Pollen Diagrams. In: *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*. John Wiley and Sons Press, Chichester. P. 455–484.
- Bezrukova E.V., Reshetova S.A., Shchetnikov A.A. (2025) Reconstruction of the Late Holocene environments in the North-Minusinsk basin based on the palynological analysis of Lake Shira sediments. *J. of Asian Earth Sci.* Vol. 289. 106610. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2025.106610>
- Blaauw M., Christen J.A. (2011) Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*. Vol. 6. Iss. 3. P. 457–474. <https://doi.org/10.1214/ba/1339616472>
- Bond G., Kromer B., Beer J. et al. (2001) Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate during the Holocene. *Science*. Vol. 294. Iss. 5549. P. 2130–2136. <https://doi.org/10.1126/science.1065680>

- Chen H., Zhu L., Wang J. et al. (2021) Paleoclimate changes over the past 13,000 years recorded by Chibuzhang Co sediments in the source region of the Yangtze River, China. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* Vol. 573. 110433.
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2021.110433>
- Chen J.H., Chen F.H., Feng S. et al. (2015) Hydroclimatic change in China and surroundings during the medieval climate anomaly and little ice age: spatial pattern and possible mechanisms. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 107. P. 98–111.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.10.012>
- Coesel P.F.M., Meesters K.J. (2013) European Flora of the Desmid Genera *Staurastrum* and *Staurodesmus*: Identification Key for Desmidiaceae-Morphology-Ecology and Distribution-Taxonomy. Zeist: KNNV Uitgeverij (Publ.). 357 p.
<https://doi.org/10.1163/9789004277915>
- Croudace I.W., Rothwell R.G. (2015) Micro-XRF Studies of Sediment Cores. Smol, J.P. (Eds.) In: *Developments in Paleoenvironmental. Dordrecht*. Springer. P. 1–25.
<https://doi.org/10.1007/978-94-017-9849-5>
- Degermendzhy A.G., Zaderев Y.S., Rogozin D.Y. et al. (2010) Vertical stratification of physical, chemical and biological components in two saline lakes Shira and Shunet (South Siberia, Russia). *Aquat. Ecol.* Vol. 44. P. 619–632.
<https://doi.org/10.1007/s10452-010-9336-6>
- Ejarque A., Julià R., Riera S. et al. (2009) Tracing the history of highland human management in the Eastern Pre-Pyrenees: an interdisciplinary palaeoenvironmental study at the Pradell fen, Spain. *The Holocene*. Vol. 19. Iss. 8. P. 1241–1255.
<https://doi.org/10.1177/0959683609345084>
- Genova S.N., Belolipetskii V.M., Rogozin D.Y. et al. (2010) A one-dimensional model of vertical stratification of Lake Shira focussed on winter conditions and ice cover. *Aquat. Ecol.* Vol. 44. P. 571–584.
<https://doi.org/10.1007/s10452-010-9327-7>
- Guy-Ohlson D. (1992) Botryococcus as an aid in the interpretation of palaeoenvironment and depositional processes. *Review of Palaeobotany and Palynology*. Vol. 71. Iss. 1–4. P. 1–15.
[https://doi.org/10.1016/0034-6667\(92\)90155-a](https://doi.org/10.1016/0034-6667(92)90155-a)
- Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G. (2001) Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *J. Paleolimnol.* Vol. 25. P. 101–110.
<https://doi.org/10.1023/A:1008119611481>
- Hildebrandt S., Müller S., Kalugin I.A. et al. (2015) Tracing the North Atlantic decadal-scale climate variability in a late Holocene pollen record from southern Siberia. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* Vol. 426. P. 75–84.
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.02.037>
- Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E. (2008) Hole-Filled SRTM for the Globe Version 4, Available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database. [Electronic data]. Access way: <http://srtm.csi.cgiar.org> (access date: 10.01.2025)
- Kalugin I., Darin A., Rogozin D. et al. (2013) Seasonal and centennial cycles of carbonate mineralisation during the past 2500 years from varved sediment in Lake Shira, South Siberia. *Quat. Int.* Vol. 290–291. P. 245–252.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.09.016>
- Kamenik C., Szeroczynska K., Schmidt R. (2007) Relationships among recent Alpine Cladocera remains and their environment: implications for climate-change studies. *Hydrobiologia*. Vol. 594. P. 33–46.
<https://doi.org/10.1007/s10750-007-9083-4>
- Kořaczek P., Zubek S., Błaszowski J. et al. (2013) Erosion or plant succession – How to interpret the presence of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota) spores. *Review of Palaeobotany and Palynology*. Vol. 189. P. 29–37.
<https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2012.11.006>
- McCarthy F.M.G., Riddick N.L., Volik O. et al. (2018) Algal palynomorphs as proxies of human impact on freshwater resources in the Great Lakes region. *Anthropocene*. Vol. 21. P. 16–31.
<https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.11.004>
- Minyuk P.S., Borkhodoev V. Ya., Wennrich V. (2013) Inorganic data from Lake El'gygytyn sediments: marine isotope stages 6–11. *Climate of the Past*. Discuss. Vol. 10. Iss. 2. P. 467–485.
<https://doi.org/10.5194/cp-10-467-2014>
- Naeher S., Gilli A., North R.P. et al. (2013) Tracing bottom water oxygenation with sedimentary Mn/Fe ratios in Lake Zurich, Switzerland. *Chem. Geol.* Vol. 352. P. 125–133.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.06.006>
- Nepop R.K., Agatova A.R., Uspenskay O.N. (2020) Climatically driven late Pleistocene – Holocene hydrological system transformation and landscape evolution in the eastern periphery of Chuya basin, SE Altai, Russia. *Quat. Int.* Vol. 538. P. 63–79.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.01.013>
- Non-Pollen Palynomorph Image Database. NON-POLLEN PALYNOMORPHS. [Electronic data]. Access way: <https://non-pollen-palynomorphs.uni-goettingen.de/> (Access date: 10.12.2024)
- Qin F., Wang Y-F., Ferguson D.K. et al. (2015) Utility of Surface Pollen Assemblages to Delimit Eastern Eurasian Steppe Types. *PLoS ONE*. Vol. 10 (3). e0119412.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119412>
- Richardson M.J. (2006) A new species of *Coniochaeta* from Perthshire. *Botanical J. of Scotland*. Vol. 58. Iss. 1. P. 105–107.
<https://doi.org/10.1080/03746600608685112>
- Rogozin D.Y., Genova S.V., Gulati R.D. et al. (2010) Some generalizations on stratification and vertical mixing in meromictic Lake Shira, Russia, in the period 2002–2009. *Aquat. Ecol.* Vol. 44. P. 485–496.
<https://doi.org/10.1007/s10452-010-9328-6>
- Rogozin D.Y., Tarnovsky M.O., Belolipetskii V.M. et al. (2017) Disturbance of meromixis in saline Lake Shira (Siberia, Russia): Possible reasons and ecosystem response. *Limnologica*. Vol. 66. P. 2–23.
<https://doi.org/10.1016/j.limno.2017.06.004>

- Şahin B. (2021) New desmid records from two high mountain lakes in Çamlıhemşin/Rize (Turkey). *Botanica Serbica*. Vol. 45. Iss. 2. P. 273–284. <https://doi.org/10.2298/BOTSERB2102273S>
- Schmidt G.A. (2010) Enhancing the relevance of paleoclimate model/data comparisons for assessments of future climate change. *J. of Quat. Sci.* Vol. 25. Iss. 1. P. 79–87. <https://doi.org/10.1002/jqs.1314>
- Seierstad I.K., Abbott P.M., Bigler M. et al. (2014) Consistently dated records from the Greenland GRIP, GISP2 and NGRIP ice cores for the past 104 ka reveal regional millennial-scale $\delta^{18}\text{O}$ gradients with possible Heinrich event imprint. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 106. P. 29–46. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.10.032>
- Steinhilber F., Abreu J.A., Beer J. et al. (2012) 9400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings. *PNAS*. Vol. 109. No. 16. P. 5967–5971. <https://doi.org/10.1073/pnas.1118965109>
- Stockmarr J. (1971) Tablets with spores used in absolute pollen analysis. *Pollen et Spores*. No. 13. P. 614–621.
- Tsarenko P., Wołowski K., Lenarczyk J. et al. (2019) Green and charophytic algae of the high-mountain Nesamovyte and Brebeneskul lakes Eastern Carpathians, Ukraine. *Plant and Fungal Systematics*. Vol. 64. No. 1. P. 53–64. <https://doi.org/10.2478/pfs-2019-0007>
- Tyson R.V. (1995) *Sedimentary Organic Matter: Organic Facies and Palynofacies*. London: Chapman & Hall (Publ.). 615 p.
- van Geel B., Gelorini, V. Lyaruu A. et al. (2011) Diversity and ecology of tropical African fungal spores from a 25,000-year palaeoenvironmental record in southeastern Kenya. *Review of Palaeobotany and Palynology*. Vol. 164. Iss. 3–4. P. 174–190. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2011.01.002>
- Wedepohl K.H. (1995) The composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta*. Vol. 59. Iss. 7. P. 1217–1232. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2)
- Walker M., Gibbard Ph., Head M.J. et al. (2019) Formal Subdivision of the Holocene Series/Epoch: A Summary. *J. Geol. Soc. India*. Vol. 93. P. 135–141. <https://doi.org/10.1007/s12594-019-1141-9>
- Yancheva G., Nowaczyk N.R., Mingram J. et al. (2007) Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon. *Nature*. Vol. 445. P. 74–77. <https://doi.org/10.1038/nature05431>
- Zhang J., Ma X., Qiang M. et al. (2016) Developing Inorganic Carbon-Based Radiocarbon Chronologies for Holocene Lake Sediments in Arid NW China. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 144. P. 66–82. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.05.034>
- Zolitschka B., Francus P., Ojala A.E.K. et al. (2015) Varves in lake sediments – a review. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 117. P. 1–41. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.03.019>
- Zykov V.V., Rogozin D. Yu., Kalugin I.A. et al. (2012) Carotenoids in Bottom Sediments of Lake Shira as a Paleoin-dicator for Reconstruction of Lake States in Khakassiya, Russia. *Contemporary Problems of Ecology*. Vol. 5. P. 434–442. <https://doi.org/10.1134/s199542551204018x>

CENTENNIAL-SCALE CLIMATE VARIABILITY IN THE NORTH MINUSINSK BASIN OVER THE LAST 3000 YEARS: PALAEOECOLOGICAL POTENTIAL OF NON-POLLEN PALYNOMORPHS FROM LAKE SHIRA¹

E. V. Bezrukova^{a, #}, S. A. Reshetova^a, N. V. Kulagina^b, A. A. Shchetnikov^b, and I. A. Filinov^b

^a*Institute of Geochemistry Siberian Branch RAS, Irkutsk, Russia*

^b*Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch RAS, Irkutsk, Russia*

[#]*E-mail: bezrukova@igc.irk.ru*

This paper presents a new palynological record from the 144-cm-long, annually-laminated sediment core Shira-2021-II-1, obtained in 2021 from the bottom sediments of the deep-water meromictic Lake Shira, located in the North Minusinsk Basin, south Siberia. Information on the history of vegetation and climate of the region in the Late Holocene is still scarce. New data allows for partially filling this gap in current knowledge. The new record of non-pollen palynomorphs and geochemical indicators of natural environmental change covers the last 3000 years at an average resolution of 21 years. The new results supplement the available regional reconstructions of the climate and dynamics of the hydrological regime of Lake Shira and confirm the assumption that changes in the lake's hydrology in the Late Holocene were mainly related to large-scale atmospheric circulation processes controlling the water and temperature balance of the Minusinsk Basin. Despite the long regional history of mobile pastoralism, non-pollen palynomorphs and geochemical indicators, as well as available pollen records,

¹ For citation: Bezrukova E. V., Reshetova S. A., Kulagina N. V., Shchetnikov A. A., and Filinov I. A. (2025) Centennial-scale climate variability in the North Minusinsk Basin over the last 3000 years: palaeoecological potential of non-pollen palynomorphs from Lake Shira. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 56. No. 4. P. 732–747 (in Russ.). <https://doi.org/10.7868/S2949179725040102>

suggest the onset of active anthropogenic activity since the second half of the 20th century. In general, the new proxy records show the importance of non-pollen palynomorphs from annually laminated lake sediments for high-resolution temporal reconstructions of lake hydroclimate and general moisture variability in steppe regions of southern Siberia.

Keywords: south Siberia; Shira Lake; lacustrine sediments; non-pollen palynomorphs; lake level; Late Holocene

ACKNOWLEDGMENTS

The research was funded by the Russian Science Foundation, Project No. 23-17-00067 (drilling, core sampling, and NPP analysis) and partially corresponds to the state assignment of the Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS (project No. 0284-2021-0003).

The authors are deeply grateful to P. P. Letunova for her help in determining the NPP, L. A. Frolova for identifying the remains of cladoceras, E. V. Kerber for working with the age model, and M. A. Krainov for his help in expedition. Special thanks to the distinguished reviewers for their helpful comments and suggestions aimed at improving the article.

REFERENCES

- Agatova A.R., Nazarov A.N., Nepop R.K. et al. (2012) Radiocarbon chronology of Holocene glacial and climatic events in southern Altai (Central Asia). *Russian Geology and Geophysics*. Vol. 53. Iss. 6. P. 546–565.
<https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.04.004>
- Amosova A.A., Chubarov V.M., Pashkova G.V. et al. (2019) Wavelength dispersive X-ray fluorescence determination of major oxides in bottom and peat sediments for paleoclimatic studies. *Appl. Radiat. Isot.* Vol. 144. P. 118–123.
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.11.004>
- Anisimova O.V. (2017) Desmidiaceous algae of sphagnum bogs of the Moscow region: species diversity and ecological confinement. *Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod imeni I.D. Papanina RAN*. Vol. 79 (82). P. 10–18 (in Russ.).
- Berglund B.E., Ralska-Jasiewiczowa M. (1986) Pollen Analysis and Pollen Diagrams. In: *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*. John Wiley and Sons Press, Chichester. P. 455–484.
- Bezrukova E.V., Reshetova S.A., Kulagina N.V. et al. (2024) Vegetation and Climate in the North of the Minusinsk Basin in the Late Holocene: A Record from Shira Lake Resolved by Decade. *Dokl. Earth Sci.* Vol. 518. No. 2. P. 1755–1760.
<https://doi.org/10.1134/s1028334x2460316x>
- Bezrukova E.V., Reshetova S.A., Shchetnikov A.A. (2025) Reconstruction of the Late Holocene environments in the North-Minusinsk basin based on the palynological analysis of Lake Shira sediments. *J. of Asian Earth Sci.* Vol. 289. 106610.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2025.106610>
- Blaauw M., Christen J.A. (2011) Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*. Vol. 6. Iss. 3. P. 457–474.
<https://doi.org/10.1214/ba/1339616472>
- Bond G., Kromer B., Beer J. et al. (2001) Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate during the Holocene. *Science*. Vol. 294. Iss. 5549. P. 2130–2136.
<https://doi.org/10.1126/science.1065680>
- Chen H., Zhu L., Wang J. et al. (2021) Paleoclimate changes over the past 13,000 years recorded by Chibuzhang Co sediments in the source region of the Yangtze River, China. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* Vol. 573. 110433.
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2021.110433>
- Chen J.H., Chen F.H., Feng S. et al. (2015) Hydroclimatic change in China and surroundings during the medieval climate anomaly and little ice age: spatial pattern and possible mechanisms. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 107. P. 98–111.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.10.012>
- Coesel P.F.M., Meesters K.J. (2013) European Flora of the Desmid Genera *Staurastrum* and *Staurodesmus*: Identification Key for Desmidiaceae-Morphology-Ecology and Distribution-Taxonomy. *Zeist: KNNV Uitgeverij (Publ.)*. 357 p.
<https://doi.org/10.1163/9789004277915>
- Croudace I.W., Rothwell R.G. (2015) Micro-XRF Studies of Sediment Cores. Smol J.P. (Eds.) In: *Developments in Paleoenvironmental. Dordrecht*. Springer. P. 1–25.
<https://doi.org/10.1007/978-94-017-9849-5>
- Degermendzhy A.G., Zadereev Y.S., Rogozin D.Y. et al. (2010) Vertical stratification of physical, chemical and biological components in two saline lakes Shira and Shunet (South Siberia, Russia). *Aquat. Ecol.* Vol. 44. P. 619–632.
<https://doi.org/10.1007/s10452-010-9336-6>
- Ejarque A., Julià R., Riera S. et al. (2009) Tracing the history of highland human management in the Eastern Pre-Pyrenees: an interdisciplinary palaeoenvironmental study at the Pradell fen, Spain. *The Holocene*. Vol. 19. Iss. 8. P. 1241–1255.
<https://doi.org/10.1177/0959683609345084>
- Frolova L.A. (2011) Cladocera (Cladocera LATREILLE, 1829, Branchiopoda, Crustacea) in paleoecological studies. In: *Metodicheskie podkhody k ispol'zovaniyu biologicheskikh indikatorov v paleoekologii*. Kazan': Kazanskii un-t (Publ.). P. 52–87 (in Russ.).
- Genova S.N., Belolipetskiy V.M., Rogozin D.Y. et al. (2010) A one-dimensional model of vertical stratification of Lake Shira focussed on winter conditions and ice cover. *Aquat. Ecol.* Vol. 44. P. 571–584.
<https://doi.org/10.1007/s10452-010-9327-7>
- Guy-Ohlsen D. (1992) Botryococcus as an aid in the interpretation of palaeoenvironment and depositional processes. *Review of Palaeobotany and Palynology*. Vol. 71. Iss. 1–4. P. 1–15.
[https://doi.org/10.1016/0034-6667\(92\)90155-a](https://doi.org/10.1016/0034-6667(92)90155-a)

- Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G. (2001) Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *J. Paleolimnol.* Vol. 25. P. 101–110. <https://doi.org/10.1023/A:1008119611481>
- Hildebrandt S., Müller S., Kalugin I.A. et al. (2015) Tracing the North Atlantic decadal-scale climate variability in a late Holocene pollen record from southern Siberia. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* Vol. 426. P. 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.02.037>
- Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E. (2008) Hole-Filled SRTM for the Globe Version 4, Available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database. [Electronic data]. Access way: <http://srtm.csi.cgiar.org> (Access date: 10.01.2025)
- Kalugin I., Darin A., Rogozin D. et al. (2013) Seasonal and centennial cycles of carbonate mineralisation during the past 2500 years from varved sediment in Lake Shira, South Siberia. *Quat. Int.* Vol. 290–291. P. 245–252. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.09.016>
- Kamenik C., Szeroczynska K., Schmidt R. (2007) Relationships among recent Alpine Cladocera remains and their environment: implications for climate-change studies. *Hydrobiologia.* Vol. 594. P. 33–46. <https://doi.org/10.1007/s10750-007-9083-4>
- Kořaczek P., Zubek S., Błaszowski J. et al. (2013) Erosion or plant succession – How to interpret the presence of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota) spores. *Review of Palaeobotany and Palynology.* Vol. 189. P. 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2012.11.006>
- Luknitskaya A.F. (2020). Conjugates (Charophyta, Zygnematomyceae) in the vicinity of Progress and Bellingshausen stations (Antarctica). *Botanicheskii zhurnal.* Vol. 105. No. 10. P. 950–956 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/s0006813620100051>
- Makunina N.I. (2010). Vegetation structure of the steppe and forest-steppe altitudinal belts of the Khakass and Tuva Mountain Basins. *Rastitel'nyi mir Azjatskoi Rossii.* No. 2. P. 50–57 (in Russ.).
- Maltsev A.E., Leonova G.A., Bobrov V.A. et al. (2020) Geochemistry of carbonates in small lakes of southern West Siberia exemplified from the Holocene sediments of Lake Itkul. *Russian Geology and Geophysics.* Vol. 61. No. 3. P. 303–321. <https://doi.org/10.15372/rgg2019081>
- Maskaev Yu.M. (1967) Forests. In: *Vegetation cover of Khakassia* Novosibirsk: Nauka (Publ.). P. 153–216 (in Russ.).
- McCarthy F.M.G., Riddick N.L., Volik O. et al. (2018) Algal palynomorphs as proxies of human impact on freshwater resources in the Great Lakes region. *Anthropocene.* Vol. 21. P. 16–31. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.11.004>
- Minyuk P.S., Borkhodoev V. Ya., Wennrich V. (2013) Inorganic data from Lake El'gygytgyn sediments: marine isotope stages 6–11. *Climate of the Past.* Discuss. Vol. 10. Iss. 2. P. 467–485. <https://doi.org/10.5194/cp-10-467-2014>
- Naeher S., Gilli A., North R.P. et al. (2013) Tracing bottom water oxygenation with sedimentary Mn/Fe ratios in Lake Zurich, Switzerland. *Chem. Geol.* Vol. 352. P. 125–133. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.06.006>
- Nepomnyashchii V.V. (Ed.) (2011) Prirodnyi kompleks i bio-ravnoobrazie uchastka “Ozero Shira” zapovednika “Khakasskii” (Natural complex and biodiversity of the “Lake Shira” section of the “Khakassky” nature reserve). Abakan: Khakasskoe knizhnoe izdatel'stvo (Publ.). 420 c. (in Russ.).
- Nepop R.K., Agatova A.R., Uspenskaya O.N. (2020) Climatically driven late Pleistocene – Holocene hydrological system transformation and landscape evolution in the eastern periphery of Chuya basin, SE Altai, Russia. *Quat. Int.* Vol. 538. P. 63–79. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.01.013>
- Nigmatullin N.M., Nigamatzyanova G.R., Valieva E.A. et al. (2022). Paleolimnological studies of the meromictic Lake Shira (Republic of Khakassia) based on the analysis of subfossil Cladocera. In: *Dinamika ekosistem v golotsene. Sbornik statei po materialam vserossiiskoi nauchnoi konferentsii, Sankt-Peterburg, 17–21 oktyabrya 2022 goda.* Sankt-Peterburg: RGPU im. A.I. Gertsena (Publ.). P. 114–118 (in Russ.).
- Non-Pollen Palynomorph Image Database. NON-POLLEN PALYNOMORPHS. [Electronic data]. Access way: <https://non-pollen-palynomorphs.uni-goettingen.de/> (Access date: 10.12.2024)
- Qin F., Wang Y-F., Ferguson D.K. et al. (2015) Utility of Surface Pollen Assemblages to Delimit Eastern Eurasian Steppe Types. *PLoS ONE.* Vol. 10 (3). e0119412. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119412>
- Richardson M.J. (2006) A new species of Coniochaeta from Perthshire. *Botanical J. of Scotland.* Vol. 58. Iss. 1. P. 105–107. <https://doi.org/10.1080/03746600608685112>
- Rogozin D., Burdin L.A., Bolobanschikova G.N., Degermendzhy A.G. (2023) The Unprecedented Current Increase in the Amount of Charcoal Particles in Sediments of Lakes of the North Minusinsk Basin (Southern Siberia): Possible Evidence of Anthropogenic Influence. *Dokl. Earth Sci.* Vol. 511. No. 2. P. 748–752. <https://doi.org/10.1134/s1028334x23600925>
- Rogozin D.Y., Genova S.V., Gulati R.D. et al. (2010) Some generalizations on stratification and vertical mixing in meromictic Lake Shira, Russia, in the period 2002–2009. *Aquat. Ecol.* Vol. 44. P. 485–496. <https://doi.org/10.1007/s10452-010-9328-6>
- Rogozin D.Y., Tarnovsky M.O., Belolipetskii V.M. et al. (2017) Disturbance of meromixis in saline Lake Shira (Siberia, Russia): Possible reasons and ecosystem response. *Limnologica.* Vol. 66. P. 2–23. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2017.06.004>
- Rogozin D. Yu., Zykov V.V., Bulkhin A.O., Degermendzhy A.G. (2020) Okenone in bottom sediments as a proxy for changes in the water level of a Saline Stratified Lake. *Dokl. Earth Sci.* Vol. 493. No. 1. P. 565–568. <https://doi.org/10.1134/s1028334x20070168>
- Şahin B. (2021) New desmid records from two high mountain lakes in Çamlıhemşin/Rize (Turkey). *Botanica Serbi-*

- ca. Vol. 45. Iss. 2. P. 273–284.
<https://doi.org/10.2298/BOTSERB2102273S>
- Schmidt G.A. (2010) Enhancing the relevance of paleoclimate model/data comparisons for assessments of future climate change. *J. of Quat. Sci.* Vol. 25. Iss. 1. P. 79–87.
<https://doi.org/10.1002/jqs.1314>
- Seierstad I.K., Abbott P.M., Bigler M. et al. (2014) Consistently dated records from the Greenland GRIP, GISP2 and NGRIP ice cores for the past 104 ka reveal regional millennial-scale $\delta^{18}\text{O}$ gradients with possible Heinrich event imprint. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 106. P. 29–46.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.10.032>
- Shashko D.I. (1967) *Agroklimaticheskoe raionirovanie SSSR (Agroclimatic zoning of the USSR)*. Moscow: Kolos (Publ.). 335 p. (in Russ.).
- Steinhilber F., Abreu J.A., Beer J. et al. (2012) 9400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings. *PNAS*. Vol. 109. No. 16. P. 5967–5971.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1118965109>
- Stockmarr J. (1971) Tablets with spores used in absolute pollen analysis. *Pollen et Spores*. No. 13. P. 614–621.
- Tsarenko P., Wołowski K., Lenarczyk J. et al. (2019) Green and charophytic algae of the high-mountain Nesamovyte and Brebeneskul lakes Eastern Carpathians, Ukraine. *Plant and Fungal Systematics*. Vol. 64. No. 1. P. 53–64.
<https://doi.org/10.2478/pfs-2019-0007>
- Tyson R.V. (1995) *Sedimentary Organic Matter: Organic Facies and Palynofacies*. London: Chapman & Hall (Publ.). 615 p.
- van Geel B., Gelorini, V. Lyaruu A. et al. (2011) Diversity and ecology of tropical African fungal spores from a 25,000-year palaeoenvironmental record in southeastern Kenya. *Review of Palaeobotany and Palynology*. Vol. 164. Iss. 3–4. P. 174–190.
<https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2011.01.002>
- Walker M., Gibbard Ph., Head M.J. et al. (2019) Formal Subdivision of the Holocene Series/Epoch: A Summary. *J. Geol. Soc. India*. Vol. 93. P. 135–141.
<https://doi.org/10.1007/s12594-019-1141-9>
- Wedepohl K.H. (1995) The composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta*. Vol. 59. Iss. 7. P. 1217–1232.
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2)
- Yancheva G, Nowaczyk N.R, Mingram J. et al. (2007) Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon. *Nature*. Vol. 445. P. 74–77.
<https://doi.org/10.1038/nature05431>
- Zhang J., Ma X., Qiang M. et al. (2016) Developing Inorganic Carbon-Based Radiocarbon Chronologies for Holocene Lake Sediments in Arid NW China. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 144. P. 66–82.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.05.034>
- Zolitschka B., Francus P., Ojala A.E.K. et al. (2015) Varves in lake sediments – a review. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 117. P. 1–41.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.03.019>
- Zykov V.V., Rogozin D. Yu., Kalugin I.A. et al. (2012) Carotenoids in Bottom Sediments of Lake Shira as a Paleoindicator for Reconstruction of Lake States in Khakassiya, Russia. *Contemporary Problems of Ecology*. Vol. 5. P. 434–442.
<https://doi.org/10.1134/s199542551204018x>