

УДК 551.89

ПЕРВЫЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ЛАНДШАФТНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ОКИНСКОГО ПЛАТО (ВОСТОЧНЫЙ САЯН) В СРЕДНЕМ-ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ

© 2022 г. Е. В. Безрукова^{1,*}, С. А. Решетова¹, Е. В. Волчатова¹, академик РАН М. И. Кузьмин¹

Поступило 16.05.2022 г.

После доработки 01.06.2022 г.

Принято к публикации 02.06.2022 г.

Центральная часть Окинского плато в горах Восточного Саяна остается одним из самых слабо изученных в палеогеографическом отношении районов Южной Сибири. Цель исследований заключалась в реконструкции истории природной среды центральной части Окинского плато в среднем-позднем голоцене и сравнении региональных изменений природной среды с их глобальными вариациями. На основе результатов палинологического анализа донных отложений оз. Саган-Нур проведены качественная реконструкция состава растительности в бассейне озера и количественная реконструкция доминирующих типов растительности с помощью метода биомизации. Реконструкция предполагает преобладание в бассейне оз. Саган-Нур тундровой растительности из кустарниковой березки, ольховника, ивы с участками лесной растительности из ели и лиственницы ок. 8120–7000 калиброванных лет назад (кал. л.н.). Климат был резко континентальным с высоким почвенным увлажнением из-за таяния летом многолетней мерзлоты. Расширение лесного биома с сосной обыкновенной в центральной части Окинского плато началось ок. 7000 кал. л.н. в условиях потепления климата и перестройки гидросети. Начиная с ~3200 кал. л.н. в бассейне озера преобладали лиственничные леса с участием сосны сибирской, что позволяет сделать вывод о более холодном, чем ранее, климате последних 3200 лет в бассейне оз. Саган-Нур. Реконструированная история природной среды центральной части плато будет способствовать определению наиболее перспективных озер и их бассейнов в горах Восточного Саяна для обеспечения их устойчивого развития с помощью специальных проектов (образовательных, туристических, геоохранных).

Ключевые слова: Восточная Сибирь, палинологический анализ, донные отложения, динамика растительности и биомов, изменения климата

DOI: 10.31857/S2686739722600722

Исследования пространственных и временных закономерностей палеоклиматических изменений в голоцене необходимы для понимания механизмов воздействия на природную среду и изучения возможных изменений в будущем. Однако непрерывные, детальные и хорошо датированные записи изменения природной среды голоцена в горах юга Восточной Сибири очень редки. Особенно ценную палеогеографическую информацию хранят донные отложения озер, которые содержат, в том числе и различные палиноморфы, наиболее часто используемые для реконструкции региональной растительности, ландшафтов и климата прошлого. Поэтому целью настоящего исследования стали реконструкция истории природной среды центральной части

Окинского плато на основе палинологической записи из отложений оз. Саган-Нур и выявление особенностей региональных изменений природной среды в контексте их глобальных вариаций.

Ультрапресное оз. Саган-Нур является одним из самых живописных, но очень слабо изученных географических объектов Окинского плато. Озеро расположено в междуречье р. Оки и р. Сорок, в межгорной котловине, в окружении гор высотой до 1824 м над у.м. Площадь водосборного бассейна оз. Саган-Нур составляет 8.5 км², максимальная глубина – 23 м, с севера на юг озеро простирается на 3.2 км, площадь водной поверхности около 1 км² [1] (рис. 1). Сток воды происходит в р. Ока. Питание озера обеспечивается атмосферными осадками, небольшой вклад вносят и грунтовые воды [1].

Климат Окинского плато умеренный, резко континентальный, с коротким и относительно теплым летом. Зимой в регионе доминирует Си-

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

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

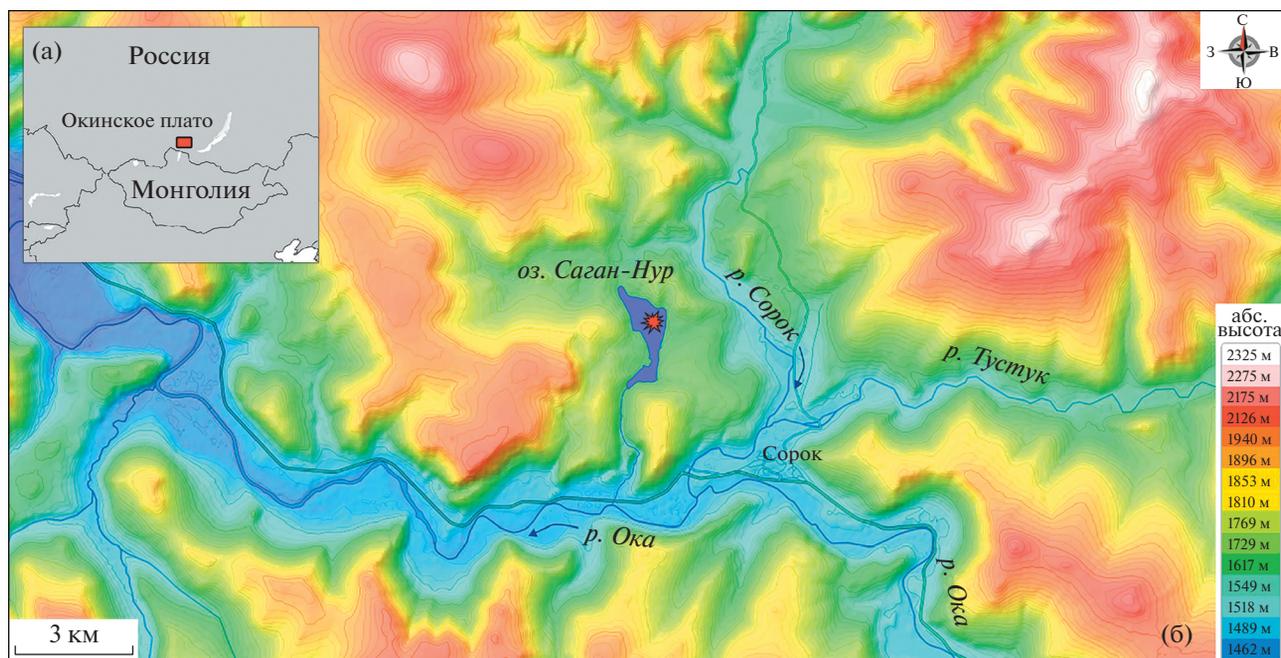


Рис. 1. Положение Окинское плато на юге Восточной Сибири (а). Гипсометрическая схема центральной части плато и местонахождение оз. Саган-Нур (б). Красной звездочкой показана точка бурения донных отложений озера.

бирский антициклон, летом погоду контролирует западный атмосферный перенос. Средняя температура воздуха июля, января и года составляет +13.1°C, -24.4°C и -5.1°C соответственно. Средняя годовая сумма атмосферных осадков не превышает 325 мм, 95% которых выпадает с мая по сентябрь [1].

В растительности Окинское плато доминируют лиственничные из *Larix sibirica* леса и редколесья, характерные для горно-таежного пояса континентального и резко-континентального климатических секторов Алтае-Саянской горной области [2]. Степная растительность занимает хорошо прогреваемые южные склоны, луговая – речные долины. Уникальное сочетание остепненных участков и лиственничной тайги придают геосистемам региона высокое значение для природопользования. Это один из немногих регионов России, где разводят яков. В водосборном бассейне и на берегах оз. Саган-Нур преобладают лиственничные кустарниковые леса, долинная лугово-болотная растительность, иногда с елью (*Picea obovata*) и лиственницей, лиственничные с березой (*Betula pendula*) и иногда с сосной сибирской (*Pinus sibirica*) леса и редколесья [1].

Донные отложения оз. Саган-Нур были опробованы в 2020 г. Длина керна составила 187 см. В его литологическом составе преобладают биогенно-терригенные илы с доминированием в них глинистой фракции до 50–80%. Возраст отложений определен радиоуглеродным методом по валловому органическому веществу пяти образцов.

Датирование проведено в ЦКП “Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии” Института географии РАН и Центре прикладных изотопных исследований Университета Джорджии (США). Значения радиоуглеродного возраста откалиброваны в программе OxCal с использованием калибровочной кривой Int Cal20 [3]. Результаты датирования представлены в табл. 1.

Результаты радиометрического датирования верхних 10 см керна с использованием неравновесного свинца ²¹⁰Pb в Институте геологии и минералогии СО РАН показали, что значение резервуарного эффекта для отложений оз. Саган-Нур составляет 470 лет. Это значение затем было вычтено из всех значений радиоуглеродных датировок, и расчет возраста каждого сантиметра в керне из оз. Саган-Нур проведен методом интерполяции между двумя соседними датами с учетом средней скорости осадконакопления между ними.

Плотность сухого осадка (ПСО), рассматриваемая как показатель повышенного поступления в озерные отложения минеральной составляющей, рассчитана для каждого сантиметра по известной методике [4]. Палинологический анализ выполнен для каждого второго сантиметра в керне, что позволило получить среднее временное разрешение записи в 100 лет. Расчет процентного содержания таксонов, построение спорово-пыльцевой диаграммы и выделение трех локальных пыльцевых зон ЛПЗ (СГН-1-3, рис. 2) проведены в про-

Таблица 1. Результаты *УМС¹⁴С-датирования отложений оз. Саган-Нур и калиброванные значения радиоуглеродного возраста

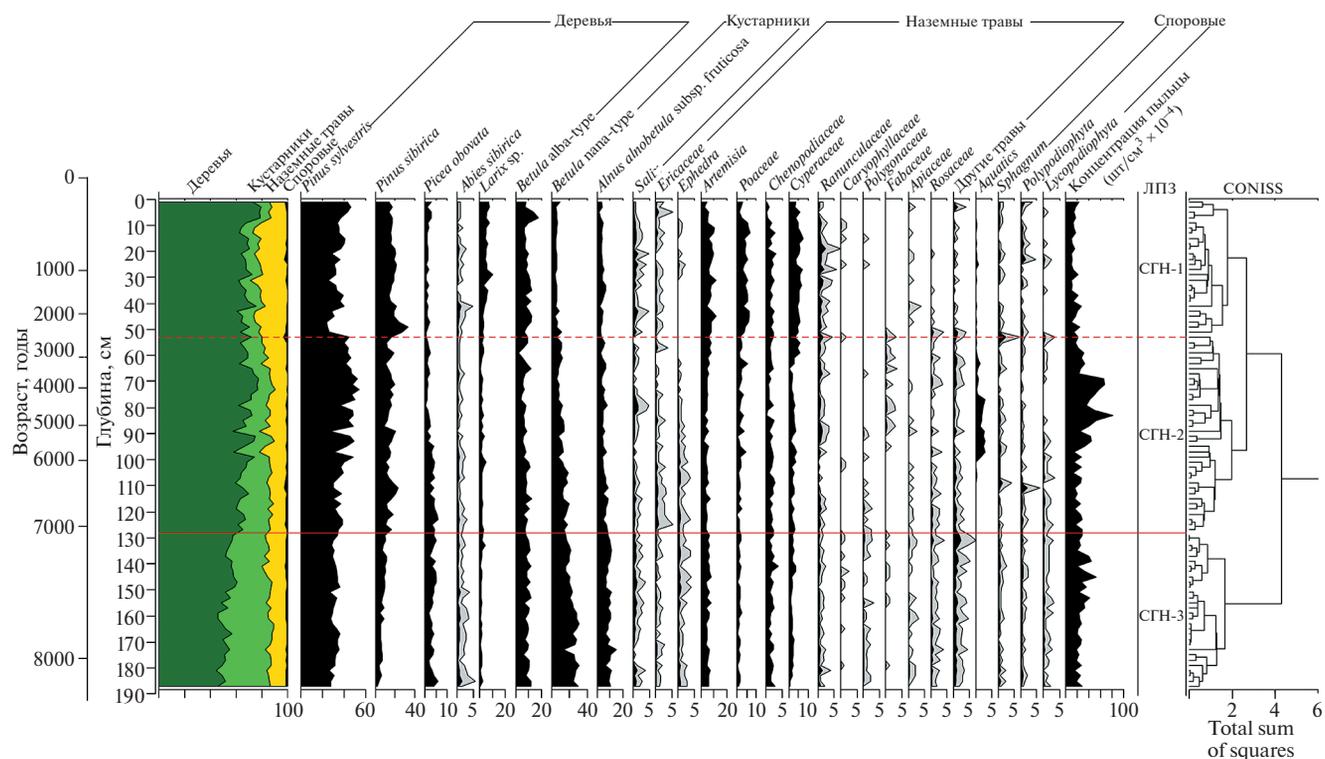
Лабораторный номер	Глубина (см)	¹⁴ С значение, лет назад (л.н.)	Калиброванный возраст калиброванных лет назад (кал. л.н.), 95% доверительный интервал	Среднее значение калиброванного возраста (кал. л.н.) с учетом резервуарного эффекта
9370-IGAN _{AMS}	10–11	545 ± 20	520–635	78
9371-IGAN _{AMS}	43–44	2465 ± 25	2387–2709	1990
9373-IGAN _{AMS}	110–111	6320 ± 30	6994–7310	6670
9374-IGAN _{AMS}	160–161	7420 ± 30	8073–8328	7770
9375-IGAN _{AMS}	184–185	7730 ± 30	8449–8909	8120

* Ускорительная масс-спектрометрия.

грамме TILIA 1.7.16 [5]. Расчет процентного содержания индивидуальных пыльцевых таксонов основан на сумме пыльцы древесных и недревесных растений. Процентное содержание спор рассчитано на основе общей суммы наземной пыльцы и спор, принятой за 100%. Метод реконструкции биомов применен нами для количественной реконструкции растительности. Биомы – крупная региональная биосистема, в которой преобладает определенный тип растительности (напр., тундра, тайга, степь, пустыня). Биом состоит из единиц более низкого ранга – функциональных типов растительности [6]. Для реконструкции

биомов согласно методу, предложенному в работе [6], все пыльцевые таксоны из палинологической записи оз. Саган-Нур (рис. 2) были отнесены к соответствующим биомам с использованием таксон-функционального типа растительности–биом матрицы, уже применявшейся для юга Восточной Сибири [7]. На рис. 3 показаны биомы, набравшие наивысший балл хотя бы для одного анализируемого спектра.

Состав спорово-пыльцевых спектров (СПС) зоны СГН-3 и реконструкция биомов предполагают мозаичный растительный покров из кустарниковых тундр с березкой (*Betula nana*), ольховником

**Рис. 2.** Палинологическая диаграмма донных отложений оз. Саган-Нур.

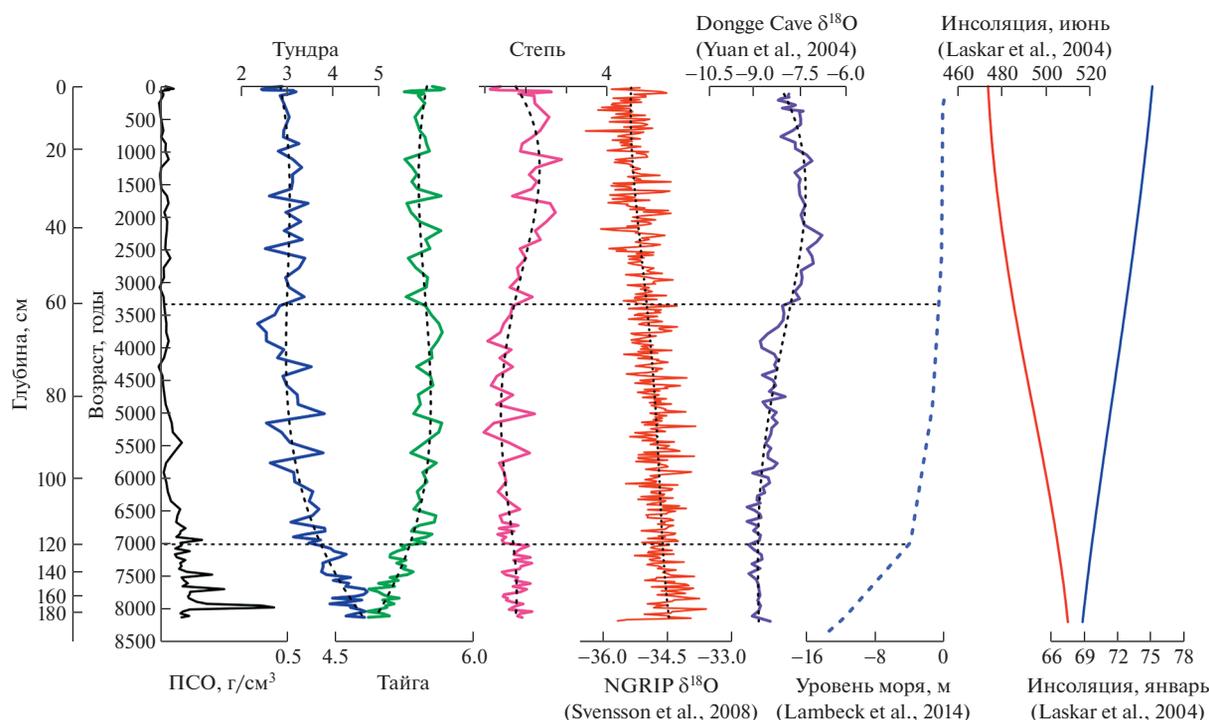


Рис. 3. Сравнение плотности сухого вещества в керне из отложений оз. Саган-Нур как показателя интенсивности поступления терригенного вещества, численных оценок (баллов) биомов тундры, тайги и степи с показателями изменения глобального климата: зимней и летней инсоляции на 55° с.ш. [9], NGRIP δ18O из Гренландии как индикатора температуры воздуха в Северном полушарии [19], Dongge Cave δ18O из китайских сталагмитов [20] как показателя активности восточно-азиатского летнего муссона и реконструированной разницей глобального уровня моря от его современных значений [8]. Пунктирные линии – линии трендов, выраженные полиномом третьего порядка и наложенные на кривые изменения биомов и изотопно-кислородные кривые.

(*Alnus alnobetula* subsp. *Fruticosa*), ивой (*Salix*) ок. 8120–7000 кал. л.н. Однако в растительности водосборного бассейна оз. Саган-Нур существовала и лесная растительность из *Picea obovata* и *Larix* (рис. 2), подразумевающая хорошо увлажненные, холодные почвы. С другой стороны, относительно высокий процент пыльцы полыней (*Artemisia*), маревых (*Chenopodiaceae*) и повышенные значения степного биома указывают на неустойчивый и периодически или сезонно засушливый климат. Это могло быть результатом более высокой, чем в настоящее время, степени континентальности климата из-за еще низкого глобального уровня моря [8], высокой летней и низкой зимней [9] инсоляции (рис. 3). Низкое обилие пыльцы сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* (27–35%) и *Pinus sibirica* (2–10%) позволяет рассматривать ее как заносный компонент, поскольку пыльца *Pinus* может разноситься ветром на значительные расстояния (>80 км) от мест произрастания [10]. Пыльца же *Larix* и *Picea obovata*, наоборот, оседает вблизи продуцирующих ее деревьев [11, 12].

Состав реконструированной растительности и высокие значения тундрового биома предполагают континентальный климат с высоким почвенным увлажнением из-за таяния многолетней

мерзлоты летом. Резкие изменения плотности донных отложений (рис. 3) свидетельствуют о ритмичном поступлении в оз. Саган-Нур терригенного материала, вероятно, из-за частых паводков. Паводки могли быть следствием активного таяния снега, ледников и многолетней мерзлоты, что могло быть обусловлено еще высокой летней инсоляцией (рис. 3) и связанными с ней теплыми летними сезонами. Это время соотносится с интервалом самых высоких положительных региональных и глобальных аномалий температуры воздуха за последние 11 300 лет во внетропической области северного полушария [13].

Повышение обилия пыльцы древесных наряду с пыльцой *Pinus sylvestris* ок. 7000 кал. л.н., реконструкция биомов (СГН-2, рис. 3) свидетельствуют о расширении с этого времени лесной растительности с сосной обыкновенной и предполагают дальнейшее потепление климата и деградацию вечной мерзлоты, поскольку именно мерзлота является важным фактором, ограничивающим рост этого вида в Сибири [14]. Прогрессирующий подъем верхней границы леса с участием сосны в Восточном Саяне с ~7000 кал. л.н. происходил синхронно с ее экспансией в горах юга Сибири и многих районах Северной Азии [15]. Однако в со-

ставе местной растительности котловины оз. Саган-Нур преобладали лиственничные леса с участием сосны сибирской и тундры из березок, ольховника, ивы. При этом снижение относительного обилия пыльцы полыней, маревых и пониженные значения степного биома могут указывать на большую, чем ранее, сомкнутость лесной растительности в бассейне оз. Саган-Нур ок 7000–3200 кал. л.н. (рис. 3).

Сокращение еловых группировок ~7000–3200 кал. л.н. могло быть обусловлено наступлением более сухого климата. Низкие значения плотности отложений в это время (рис. 3) свидетельствуют о снижении потока терригенного вещества в воды озера. Однако следует рассматривать еще одну не менее важную причину сокращения площадей ели. Этой причиной могла стать перестройка гидрографической сети в центральной части Окинского плато и в бассейне оз. Саган-Нур. Известно, что в дополнение к атмосферным осадкам поступление талых вод от таяния мерзлоты и ледников также могло играть ключевую роль в колебаниях уровня озер в раннем голоцене при высокой летней инсоляции, особенно в случае ледниковых озерных бассейнов на горных плато [16]. Предполагается, что позднеплейстоценовые ледники в горах юга Восточной Сибири кардинально сократились или полностью исчезли как раз в среднем голоцене [17]. Снижение объема поступавших в оз. Саган-Нур талых вод приводило к меньшей водности рек, исчезновению временных водотоков, и, в итоге, к сокращению влажных долинных мест обитания для ели.

Начиная с ~3200 кал. л.н. (СГН-1) повысившееся обилие пыльцы полыней, злаковых Poaceae, маревых, осоковых Suraegaseae свидетельствует о том, что лесная растительность стала более открытой. Реконструкция биомов поддерживает такую интерпретацию, показывая расширение степного биома (рис. 3). Повышение относительного обилия пыльцы *Pinus sibirica*, *Larix* предполагает появление в бассейне озера сосны сибирской и региональное преобладание лиственничных лесов. Леса такого состава связаны с холодными мерзлотными почвами [18], и широкое развитие лиственничных лесов позволяет сделать вывод о более холодном, чем ранее, климате последних 3200 лет в бассейне оз. Саган-Нур. Повышенное содержание пыльцы *Salix*, Suraegaseae могло быть результатом заболачивания берегов озера из-за постепенного снижения его уровня. Минимальные значения плотности отложений в последние ~ 3200 лет означают слабый поток терригенного материала с береговым стоком.

Сравнение реконструированной динамики региональных биомов с изменением глобального климата из различных природных архивов умеренных широт Евразии (рис. 3) показывает, что

самое высокое поступление терригенного вещества в озеро, максимальное развитие тундрового биома в бассейне оз. Саган-Нур в среднем поздне голоцене имели место около 8120–7000 кал. л.н. одновременно с гораздо более низким, чем сегодня, уровнем мирового океана [8], пониженной зимней и повышенной летней [9] инсоляцией (рис. 3). Усиление позиций таежного биома произошло позднее 7000 кал. л.н. одновременно с резким повышением уровня мирового океана, похолодания [19] в Северном полушарии (NGRIP $\delta^{18}\text{O}$, рис. 3). Повышение значений степного биома, начиная с ~3200 кал. л.н., может быть соотнесено с неоплейстоценовым похолоданием, снижением летней инсоляции, активности азиатского летнего муссона [20], что хорошо выражено в климатических сигналах из ледников Гренландии и сталагмитов Китая (рис. 3).

В результате проведенных исследований получена первая непрерывная, детальная реконструкция растительности и биомов центральной части Окинского плато за последние 8120 лет. Основные изменения состава СПС в отложениях оз. Саган-Нур происходили параллельно изменениям глобального климата (рис. 3), что указывает на высокую чувствительность региональной растительности к изменениям глобального/регионального климата и пригодность полученных данных для реконструкции динамики растительности и изменений климата. Отсутствие в СПС из отложений оз. Саган-Нур пыльцы растений-индикаторов сельскохозяйственных культур или выпаса животных предполагает незначительную активность человека в бассейне озера вплоть до настоящего времени.

Полученные реконструкции будут способствовать определению наиболее перспективных озер и их бассейнов в горах Восточного Саяна для потенциального устойчивого развития с помощью специальных проектов: образовательных, туристических, геоохранных, сельскохозяйственных.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны А.А. Щетникову, И.А. Филинову, М.А. Крайнову за помощь в оформлении части рисунков и проведение полевых работ, Э.П. Зазовской за датирование отложений.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ-Лондонское Королевское общество № 21-55-10001 и в соответствии с государственным заданием Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (проект № 0284-2021-0003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vladimirov I.N., Vyrkin V.B., Ilyicheva E.A., Kobylkin D.V., Pavlov M.V., Zehong Li.* Natural Conditions and Ecological Potential of Geosystems in the Central Part of the Oka Plateau (Eastern Sayan) // *Geography and Natural Resources.* 2019. V. 40. № 3. P. 264–274.
2. *Телятников М.Ю.* Растительность восточной части Восточного Саяна (высокогорный и горнолесной пояса). Новосибирск: Академиздат. 2016. 103 p.
3. *Heaton T.J., Blaauw M., Blackwell P.J., Bronk Ramsey Ch., Reimer P.J., Marian Scot E.* The IntCal20 Approach to Radiocarbon Calibration Curve Construction: A New Methodology Using Bayesian Splines and Errors-in-variables // *Radiocarbon.* 2020. № 62 (4). P. 821–863.
4. *Janssens J.A.* A Quantitative Method for Stratigraphic Analysis of Bryophytes in Holocene Peat // *J. Ecol.* 1983. V. 71. P. 189–196.
5. *Grimm E.C.* Tilia 1.7.16 Software. Springfield, IL: Illinois State Museum. Research and Collection Center. 2011.
6. *Prentice I.C., Guiot J., Huntley B., Jolly D., Cheddadi R.* Reconstructing Biomes from Palaeoecological Data: A General Method and its Application to European Pollen Data at 0 and 6 ka // *Clim. Dynam.* 1996. V. 12. P. 185–194.
7. *Kobe F., Bezrukova E.V., Leipe C., Shchetnikov A.A., Goslar T., Wagner M., Kostrova S.S. and Tarasov P.E.* Holocene Vegetation and Climate History in Baikal Siberia Reconstructed from Pollen Records and its Implications for Archaeology // *Archaeological Research in Asia.* 2020. V. 23. 100209.
8. *Lambeck K., Rouby H., Purcell A., Sun Y., Sambridge M.* Sea Level and Global Ice Volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene // *PNAS.* 2014. V. 111. P. 15296–15303.
9. *Laskar J., Robutel P., Joutel F., Gastineau M., Correia A.C.M., Levrard B.* A Long-term Numerical Solution for the Insolation Quantities of the Earth // *Astron. Astrophys.* 2004. V. 428. P. 261–285.
10. *Ma Y.Z., Liu K.-B., Feng Z.D., Sang Y.L., Wang W., Sun A.Z.* A Survey of Modern Pollen and Vegetation along a South-north Transect in Mongolia // *Journal of Biogeography.* 2008. V. 35. P. 1512–1532.
11. *Bezrukova E.V., Abzaeva A.A., Letunova P.P., Kulagina N.V., Vershinin K.E., Belov A.V., Orplova L.A., Danko L.V.* Post-glacial History of Siberian Spruce (*Picea obovata*) in the Lake Baikal Area and the Significance of this Species as Paleo-environmental Indicator // *Quat. Int.* 2005. V. 136. P. 18–32.
12. *Niemeyer B., Klemm J., Pestryakova L.A., Hertzschuh U.* Relative Pollen Productivity 818 Estimates for Common Taxa of the Northern Siberian Arctic // *Review of Palaeobotany and Palynology.* 2015. V. 221. P. 71–82.
13. *Marcott Sh.A., Shakun J.D., Clark P.U., Mix A.C.* Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years // *Science.* 2013. V. 339. P. 1198–1201.
14. *Шумилова Л.В.* Основные черты коренного растительного покрова Сибири и закономерности его географического распределения // *Труды Томского государственного университета.* 1960. Т. 148. С. 171–182.
15. *Zhang D., Feng Z.* Holocene Climate Variations in the Altai Mountains and the Surrounding Areas: A Synthesis of Pollen Records // *Earth-Science Reviews.* 2018. V. 185. P. 847–869.
16. *Hou Y., Long Ha., Shen J., Gao L.* Holocene Lake-level Fluctuations of Selin Co on the Central Tibetan Plateau: Regulated by Monsoonal Precipitation or Meltwater? // *Quatern. Sci. Rev.* 2021. V. 261. 106919.
17. *Stepanova O.G., Trunova V.A., Osipov E.Yu., Kononov E.E., Vorobyeva S.S., Parkhomchuk E.V., Kalinkin P.N., Vorobyeva E.E., Vershinin K.E., Rastigeev S.A., Fedotov A.P.* Glacier Dynamics in the Southern Part of East Siberia (Russia) from the Final Part of the LGM to the Present Based on Biogeochemical Proxies from Bottom Sediments of Proglacial Lakes // *Quat. Int.* 2019. V. 524. P. 4–12.
18. *Огуреева Г.Н., Бочарников М.В.* География разнообразия бореальных лесов у южной границы распространения и их картографирование (горы Южной Сибири и Монголии) // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География.* 2014. № 5. С. 53–61.
19. *Svensson A., Andersen K.K., Bigler M., Clausen H.B., Dahl-Jensen D., Davies S.M., Johnsen S.J., Muscheler R., Parrenin F., Rasmussen S.O., Röthlisberger R., Seierstad I., Steffensen J.P., Vinther B.M.* A 60000 year Greenland Stratigraphic Ice Core Chronology // *Clim. Past.* 2008. V. 4. P. 47–57.
20. *Yuan D.X., Cheng H., Edwards R.L., Dykoski C.A., Kelly M.J., Zhang M.L., Qing J.M., Lin Y.S., Wang Y.J., Wu J.Y., Dorale J.A., An Z.S., Cai Y.J.* Timing, Duration, and Transitions of the Last Interglacial Asian Monsoon // *Science.* 2004. V. 304. P. 575–578.

FIRST RECONSTRUCTIONS OF VEGETATION AND CLIMATE CHANGES IN THE CENTRAL PART OF THE OKA PLATEAU (EAST SAYAN MOUNTAINS) IN THE MIDDLE-LATE HOLOCENE

E. V. Bezrukova^{a, #}, S. A. Reshetova^a, E. V. Volchatova^a, and Academician of the RAS M. I. Kuzmin^a

^a*A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

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

As regards paleogeography, the Central part of the Oka Plateau lying in the East Sayan Mountains is still a poorly studied area of the South Siberia. This gap can be partially replenished by the results of the present study. The study focuses on the reconstruction of the environment of the central part of the Oka Plateau in

the Middle-Late Holocene. The pollen analysis of bottom sediments from Sagan-Nur Lake was used to provide the qualitative reconstruction of the vegetation in the lake's catchment combined with the quantitative reconstruction of dominant vegetation types obtained via the biomization method. The composition of the reconstructed vegetation combined with high scores for the tundra biome suggests the dominance of the tundra vegetation consisting of dwarf birch, alder and willow interrupted by patches of spruce and larch stands, between ca. 8120 and 7000 cal. yr BP. The climate was sharp continental with high soil moisture resulting from summer permafrost thaw. In the Central part of the Oka Plateau, the expansion of the forest biome began at ca. 7000 cal. yr BP due to climate warming, hydrological network reconstruction resulting from complete thaw of regional glaciers and degradation of permafrost rocks. Around ca. 3200 cal. yr BP, the larch forests with the participation of Siberian pine started to spread across Lake Sagan-Nur catchment, thus suggesting colder conditions than before. The obtained reconstructions can help in identifying the promising lakes and their catchment areas in the East Syan Mountains for potential sustainable development through special projects (e.g. educational, tourist, environmentally-protected).

Keywords: East Siberia, palynological record, lacustrine sediments, vegetation and biome dynamics, climate change