

## СТАБИЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ УГЛЕРОДА И КИСЛОРОДА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕРА СЫРЫТКУЛЬ (ЮЖНЫЙ УРАЛ) КАК ИНДИКАТОРЫ ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ГОЛОЦЕНА

Выполнена реконструкция условий осадконакопления оз. Сырыткуль интервала 11000–5000 <sup>14</sup>C лет. Отмечено совпадение границ палинозон и климатических стадий, выделенных по изотопным кривым углерода и кислорода. С помощью спорово-пыльцевого анализа подтверждено предположение о связи изменения изотопного состава кислорода и углерода с количеством атмосферных осадков и испарением.

Ключевые слова: голоцен, озерные отложения, стабильные изотопы углерода, отношение изотопов кислорода, спорово-пыльцевой анализ.

Отношения стабильных изотопов кислорода и углерода издавна используются для палеореконструкций [11; 10]. Стабильные изотопы в озерных отложениях позволяют выявить изменения палеогеографических условий в относительно короткие интервалы времени [4]. Отношение стабильных изотопов кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) в озерной воде зависит от изотопного состава притоков, атмосферных осадков, грунтовых вод и испарения [5]. На основе данных о составе стабильных изотопов углерода ( $\delta^{13}\text{C}$ ) можно судить о величине испарения, количестве и изотопном составе атмосферных осадков [8; 13; 14; 18], интенсивности фотосинтеза в водоеме, его продуктивности [15; 19], наличии аллохтонного поступления карбонатов [9; 17], облачности и интенсивности солнечной радиации [16], изотопном составе углерода воздуха в прошлом [6], соотношении С4 и С3 растений в растительном покрове [7; 17].

### Методы исследования

Колонка донных осадков оз. Сырыткуль (кern донных отложений длиной 572 см) отобрана в июле 2010 г. с платформы катамарана в центральной части озера. Донные осадки верхней части колонки мощностью 22 см отобраны пробоотборником гравитационного типа с закрывающейся диафрагмой, остальная часть поршневой трубкой с гидрозатвором. Изотопному анализу подвергалась карбонатная часть разреза (572140 см)

Анализ изотопов углерода и кислорода выполнен в лаборатории изотопно-аналитической геохимии Аналитического центра Института геологии и минералогии СО РАН (аналитик О.А. Изох).

Радиоуглеродные датировки получены по трем пробам навесками 15 мг (интервалы отбора проб 533–535 см, 513–515 см, 170–172 см) с помощью ускорительной масс-спектрометрии AMS <sup>14</sup>C в университете г. Лунд (Швеция, аналитик М. Лундгрэн).

Приготовление проб для спорово-пыльцевого анализа осуществлялось методом обработки малой навески материала с использованием фтористоводородной кислоты [2]. Определение и подсчет спор, пыльцы (200–500 зерен в препарате) выполнено соответственно при увеличении 600 крат на оптическом микроскопе Микмед-5.

Возрастная модель колонки донных отложений оз. Сырыткуль получена корреляцией со спорово-пыльцевой диаграммой донных отложений оз. Уфимское [1]. В качестве эталона периодизации голоцена использовалась схема Блитта-Сернандера, хронологически уточненная Н.А. Хотинским [3].

### Результаты

#### Спорово-пыльцевой анализ

Спорово-пыльцевые спектры (СПС) отложений аллереда (Al, интервал 570–555 см) характеризовались максимумом пыльцы *Larix sibirica Ledeb.* (44%), относительно высоким содержанием пыльцы анемофильных трав (38%), представленных практически в равных долях *Artemisia sp.*, *Poaceae*, *Chenopodiaceae* (рис. 1). В составе спорово-пыльцевых спектров преобладала пыльца древесных растений (60%), что свидетельствует о более теплом и мягком по сравнению с поздним дриасом климате.

СПС донных отложений позднего дриаса ( $Dr_3$ , интервал 555–531 см) характеризовались преобладанием пыльцы анемофильных трав (*Artemisia sp.*, *Poaceae*), что указывает на похолодание и аридизацию климата.

Для спорово-пыльцевых спектров пребореала (PB, интервал 531–470 см) отмечалось значительное увеличение количества пыльцы древесных растений (до 60%), постепенное возрастание содержания пыльцы *Betula sect. Albae* (до 45%), *Pinus sylvestris L.* (до 10%). Во второй половине пребореала (PB2, интервал 504–470 см) появилась пыльца *Ephedra distachia L.*, увеличилось содержание пыльцы трав и *Betula sect. Nanae*, что свидетельствует о похолодании и аридизации климата (переславское похолодание или пребореальная осциляция).

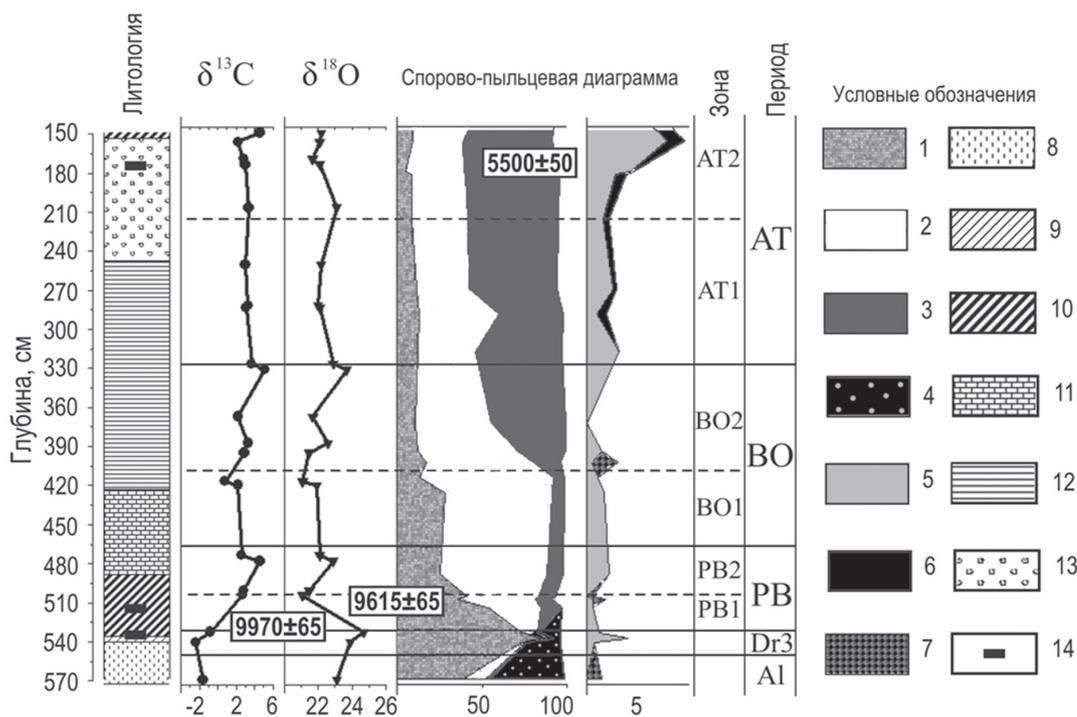
В спорово-пыльцевых спектрах донных отложений начала бореала (BO1, интервал 470–395 см) возросло содержание пыльцы древесных пород и ели. Донные осадки второй половины бореала (BO2, интервал 395–327 см) характе-

ризовались уменьшением содержания пыльцы *Picea sp.*, повышением количества пыльцы трав, что указывает на аридизацию климата.

Нижняя граница атлантического периода (AT, интервал 330–140 см) проводится на уровне появления пыльцы широколиственных пород и повышения содержания пыльцы *Picea sp.* Высокое содержание пыльцы ели, присутствие пыльцы широколиственных пород указывают на повышение увлажнения и потепление климата.

#### Изотопный анализ

По данным изотопного анализа донных отложений оз. Сырыткуль, значения  $\delta^{18}O$  изменялись от 21,1‰ до 24,7‰, а  $\delta^{13}C$  – от -2,4‰ до 5,1‰. Максимальная величина отношения изотопов кислорода (24,7‰) отмечалась для донных осадков, накопленных в сухих условиях позднего дриаса ( $Dr_3$ , интервал 550–530 см). В то же время для донных отложений аллереда–позднего дриаса выявлялись относительно невысокие значения отношений стабильных изо-



1 – травы; 2 – *Betula sect. Albae*; 3 – *Pinus sylvestris*; 4 – *Larix sibirica*; 5 – *Picea sp.*; 6 – широколиственные породы; 7 – *Betula sect. Nanae*; 8 – сизая глина; 9 – буровато-серая глина; 10 – оранжевый сапропель с бурыми прослоями; 11 – розоватый сапропель с коричневыми прослоями; 12 – слоистый сапропель неоднородной окраски; 13 – серый сапропель с ракушей; 14 – места отбора проб на радиоуглеродные датировки (AMS  $^{14}C$ )

Рисунок 1. Сопоставление данных спорово-пыльцевого и изотопного анализа донных отложений оз. Сырыткуль.  $\delta^{18}O$  и  $\delta^{13}C$  в ‰; пыльца – %

топов углерода. Озерная известь пребореала-атлантика (РВ-АТ, интервал 504–156) характеризовалась корреляцией значений  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$

В донных отложениях начала пребореала (РВ1, интервал 531–504 см) величина  $\delta^{13}\text{C}$  резко возросла (2,7‰), а  $\delta^{18}\text{O}$  – снизилась (21,1‰). В донных осадках второй половины пребореала (РВ2, интервал 504–470 см) значения  $\delta^{18}\text{O}$  (21,5–23,0‰) и  $\delta^{13}\text{C}$  (2,8–4,6‰) повышались. Донные отложения первой половины бореала (ВО1, интервал 470–395 см) характеризовались понижением величин  $\delta^{18}\text{O}$  (21–22‰) и  $\delta^{13}\text{C}$  (0,8–2‰). Для донных осадков второй половины бореала (ВО2, интервал 395–327 см) отмечалось повышение значений  $\delta^{18}\text{O}$  (21,5–23,7‰) и  $\delta^{13}\text{C}$  (3–5‰). В озерных отложениях атлантического периода (АТ, интервал 327–156 см) содержание тяжелых изотопов углерода  $\delta^{13}\text{C}$  (2,2–3,3‰) и кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  (21,7–22‰) уменьшалось.

### Обсуждение

Исходя из сопоставления данных спорово-пыльцевого и изотопного анализа, был сделан вывод относительно связи высоких значения  $\delta^{18}\text{O}$  в донных отложениях позднего дриаса с обогащением озерной воды тяжелым изотопом кислорода при увеличении интенсивности испарения [5]. Причиной пониженного содержания тяжелого изотопа углерода (от -2,4 до -0,8‰), вероятно, является низкая продуктивность водоема (рис. 1).

Согласно модели McKenzie [19] возрастание первичной продукции водоема приводит к интенсивному употреблению  $^{12}\text{C}$  в процессе фотосинтеза, в связи с преимущественным фиксированием легкого изотопа углерода рибозо-1,5-бисфосфаткарбоксилазой [12]. В результате увеличивается содержание растворенного неорганического углерода, обогащенного  $^{13}\text{C}$ , что приводит к накоплению кальцита с высоким содержанием тяжелого изотопа углерода. Таким образом, повышение величины  $\delta^{13}\text{C}$  до 2,7‰ в донных осадках пребореала можно объяснить возрастанием продуктивности водоема. Понижение содержания тяжелых изотопов

кислорода в донных отложениях начала пребореального периода, вероятно, было связано с увлажнением климата и разбавлением озерных вод атмосферными осадками.

Корреляция значений  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  в озерной извести пребореала-атлантика позволила сделать вывод относительно наличия единой причины изменений содержаний тяжелых изотопов. К тому же, согласно литературным данным, соответствие величин  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  характерно для бессточных водоемов [13].

В результате сопоставления подразделений, полученных с помощью изотопии углерода и кислорода и палинозон, выделенных на основе спорово-пыльцевого анализа, было выявлено совпадение их границ. Данная особенность позволяет сделать вывод о влиянии изменения параметров палеоклимата на изотопный состав донных отложений. Исходя из данных спорово-пыльцевого и изотопного анализов, очевидным является заключение о решающей роли колебаний влажности климата для изменения состава стабильных изотопов углерода и кислорода в донных осадках оз. Сырыткуль. На основе изучения части колонки донных осадков с коррелирующими значениями  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  (РВ-АТ, интервал 504–156), нами было выделено три периода гумидизации (РВ1, ВО1, АТ) и два периода аридизации климата (РВ2, ВО2).

### Заключение

Таким образом, нами были получены данные анализа изотопного состава углерода и кислорода донных отложений оз. Сырыткуль. Отмечено совпадение границ палинозон и климатических стадий, выделенных по изотопным кривым углерода и кислорода. С помощью спорово-пыльцевого анализа подтверждено предположение о связи изменения изотопного состава кислорода и углерода с влажностью климата. Выявлено, что высокие значения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  характерны для периодов пониженной влажности, а снижение содержания тяжелых изотопов отмечается при уменьшении влагообеспеченности территории.

20.12.2011

**Исследования выполнены при финансовом содействии  
Интеграционного проекта ДВО-СО-УрО РАН (№ 09-С-5-1001), проектов поддержки  
фундаментальных исследований УрО РАН (№ 12-И-5-2018 и № 12-М-45-2051),  
гранта поддержки аспирантов и молодых ученых УрО РАН,  
гранта РФФИ (№ 10-05-96012-р-урал\_а), Тематического плана ЮУрГУ № 1.908.**

**Список литературы:**

1. Масленникова, А.В. Реконструкция условий осадконакопления в оз. Уфимское (Южный Урал) на основе спорово-пыльцевого и диатомового анализа // VII Международная научная конференция «География, геоэкология, геология: опыт научных исследований». – 2010. – С. 82–83.
2. Хазина, И.В. Реконструкция природно-климатических обстановок среднего-позднего голоцена новосибирского Приобья // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47, №8. – С. 971–978.
3. Хотинский, Н.А. Голоцен северной Евразии. – М.: Наука, 1977. – 200 с.
4. Общие закономерности возникновения и развития озер. Методы изучения истории озер. – Л.: Наука, 1986. – 254 с.
5. Anderson L., Abbott M.B. Holocene Climate inferred from Oxygen Isotope Ratios in Lake Sediments, Central Brooks Range, Alaska // Quaternary research. – 2001. – P. 1–9.
6. Beerling, D.J. Interpreting environmental and biological signals from the stable carbon isotope composition of fossilized organic and inorganic carbon // Journal of the Geological Society. – 1997. – V. 154. – P. 303–309.
7. Cerling T.E., Wang Y., Quade J. Expansion of C4 ecosystems as an indicator of global ecological change in the late Miocene // Nature. – 1993. – P. 344–345.
8. Chase B.M., Quick L.J., Meadows M.E., Scott L., Thomas D.S.G., Reimer P.J. Late glacial interhemispheric climate dynamics revealed in South African hyrax middens // Geology. – 2011. – V. 39, №1. – P. 19–22.
9. Choudary P., Routh J., Chakrapani G.J. Comparison of bulk organic matter characteristics in sediments of three Kumaun Himalayan lakes // Current science. – 2009. – V. 97, №4. – P. 572–575.
10. Dansgaard W., Johnsen S.J., Moller J., Langway C.C. One thousand centuries of climatic record from Camp century on the Greenland ice sheet // Science. – 1969. – V. 166. – P. 377–380.
11. Emiliani, C. Pleistocene temperatures // J. Geol. – 1955. – V. 63. – P. 538–578.
12. Farquar G.D., O'Leary M.H., Berry J.A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves // Australian Journal of Plant Physiology. – 1982. – №9. – P. 121–137.
13. Fushun W., Guojiang W., Congqiang L., Siqin X. The correlation of inorganic C, O Isotopic values for Lake Chenghai sediments and its environmental implications // Chinese Journal of geochemistry. – 2002. – V. 21, №2. – P. 186–192.
14. Hatté C., Fontugne M., Rousseau D-D. 13C variations of loess organic matter as a record of the vegetation response to climatic changes during the Weichselian // Geology. – 1998. – V. 26, №7. – P. 583–586.
15. Hollander D.J., Smith M.A. Microbially mediated carbon cycling as a control on the  $\delta^{13}\text{C}$  of sedimentary carbon in eutrophic Lake Mendota (USA): New models for interpreting isotopic excursions in the sedimentary record // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2001. – V. 65. – P. 4321–4337.
16. Kirby M.E., Mullins H.T., Patterson W.P., Burnett A.W. Late glacial–Holocene atmospheric circulation and precipitation in the northeast United States inferred from modern calibrated stable oxygen and carbon isotopes // GSA Bulletin. – 2002. – V. 114, №10. – P. 1326–1340.
17. Lane C.S., Mora C.I., Horn S.P., Orvis K.H. Sensitivity of bulk sedimentary stable carbon isotopes to prehistoric forest clearance and maize agriculture // Journal of Archaeological Science. – 2008. – №35. – P. 2119–2132.
18. Liutkus C.M., Wright J.D., Ashley G.M. Paleoenvironmental interpretation of lake-margin deposits using  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  results from early Pleistocene carbonate rhizoliths, Olduvai Gorge, Tanzania // Geological Society of America. – 2005. – V. 33, №5. – P. 377–380.
19. McKenzie, J.A. Carbon isotopes and productivity in the lacustrine and marine environment // Chemical processes in lakes. – P. 99–118.

Сведения об авторах:

**Масленникова Анна Валерьевна**, м.н.с., лаборатория МТиГЭ

456317, Челябинская область, г. Миасс, Ильменский заповедник, e-mail: adenophora@inbox.ru

**Удачин Валерий Николаевич**, заведующий лабораторией, канд. геол.-мин. наук, доцент

456317, Челябинская область, г. Миасс, Ильменский заповедник, e-mail: udachin@ilmeny.ac.ru

**Дерягин Владимир Владиславович**, доцент кафедры географии и методики преподавания географии

Челябинского педагогического университета, кандидат географических наук, доцент

454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69, e-mail: vderyagin@mail.ru

**UDC 550.42:551.14; 551.83**

**Maslennikova A.V., Udachin V.N., Deryagin V.V.**

E-mail: adenophora@inbox.ru, udachin@ilmeny.ac.ru, vderyagin@mail.ru

**STABLE CARBON AND OXYGEN ISOTOPES OF LAKE SIRITKUL (SOUTH ULAL) SEDIMENTS AS INDICATORS OF HOLOCENE CONDITIONS**

Lake Siritkul sedimentation conditions reconstruction of 11000–5000  $^{14}\text{C}$  yr. B.P. interval were carried out. There were revealed coincidence of pollen-zones and climatic stages determined on the basis of isotopic analyses. The assumption of connection between atmospheric precipitation, evaporation and isotopic content of carbon and oxygen was confirmed with the help of pollen analysis.

Key words: Holocene, lake sediments, stable isotopes of carbon, oxygen isotopes ratio, pollen analysis.