

УДК 550.42

РЕКОНСТРУКЦИЯ КЛИМАТА ЗАБАЙКАЛЬЯ В ГОЛОЦЕНЕ НА ОСНОВЕ ИЗОТОПНО-КИСЛОРОДНОГО АНАЛИЗА СТВОРОК ИСКОПАЕМЫХ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ оз. КОТОКЕЛЬ

© 2013 г. С. С. Кострова, Х. Майер, Б. Чаплыгин,
Е. В. Безрукова, П. Е. Тарасов, академик М. И. Кузьмин

Поступило 25.02.2013 г.

DOI: 10.7868/S0869565213190183

Диаомовые водоросли, или диатомеи (*Bacillariophyta*), — микроскопические одноклеточные организмы с кремнистым скелетом-панцирем, состоящим из двух створок, — играют важную роль в процессах морского и озерного осадконакопления. Данные диаомового анализа позволяют получать надежные пространственно-временные реконструкции природной среды и климата прошлых геологических эпох [1].

Возможность исследования створок диатомей изотопно-кислородным методом с целью получения палеоинформации впервые показал Л. Лабейре [2]. Построенные изотопные кривые отражают изменения температуры и изотопного состава воды ($\delta^{18}\text{O}_w$) [2, 3], который, в свою очередь, определяется изотопным составом атмосферных осадков ($\delta^{18}\text{O}_{\text{атм}}$) и гидрологическими особенностями исследуемого водоема [4].

Для центрально-азиатского региона изотопно-кислородные записи с низким временным разрешением получены из межледниковых отложений оз. Байкал [5, 6]. Огромные размеры его котловины (площадь акватории около 31.5 тыс. км², средняя глубина около 745 м) и водосборного бассейна (около 560 тыс. км²) значительно усредняют палеоклиматический сигнал, а бедность донных осадков органическим веществом затрудняет радиоуглеродное датирование. Озеро Котокель (площадь около 69 км², средняя глубина 5–6 м), расположенное на восточном побережье оз. Байкал, в его водосборном бассейне (рис. 1), более перспективно для получения информации о кли-

мате Забайкалья в позднечетвертичное время [7]. Высокое содержание органического вещества и отсутствие резервуарного эффекта позволяют надежно датировать отложения этого озера, а положение водосборного бассейна (площадь около 183 км²) на границе таежной и степной зон обеспечивает высокую чувствительность экосистемы озера к изменению режима тепло- и влагообеспеченности [7].

В данной статье представлены результаты изотопно-кислородного анализа створок диатомовых водорослей из датированной AMS ¹⁴C-методом колонки донных отложений (КТК2: 52°47' с.ш., 108°07' в.д., глубина озера 3.5 м, общая длина керна 1253 см) оз. Котокель и обсуждаются возможные причины изменения изотопного сигнала.

Створки диатомей извлечены с помощью многостадийной методики [8] из верхнего в 500 см слоя осадков, который сформировался в течение последних 11500 лет и представлен черно-коричневой гиттией [7]. Методы сканирующей электронной микроскопии и энерго-дисперсионной спектроскопии показали отсутствие в полученных образцах видимой примеси терригенного материала и низкое содержание Al₂O₃ (не более 1.61%), что подтверждает их пригодность для изотопных исследований. Разложение створок для изотопного анализа проводили с помощью лазера в атмосфере BrF₅ после дегидратации образцов в потоке гелия [9]. Определение $\delta^{18}\text{O}$ осуществляли на масс-спектрометре PDZ Europa 2020 в Институте полярных и морских исследований Альфреда Вегенера (АВИ, Потсдам, Германия). Ошибка определения $\delta^{18}\text{O}$ составила $\pm 0.25\text{‰}$ (1 σ). Правильность полученных значений $\delta^{18}\text{O}$ контролировали регулярными измерениями рабочего стандарта BFC [9]. Среднее временное разрешение изотопной записи, определенное с учетом возрастной модели [7], 150 лет.

Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского
отделения Российской Академии наук, Иркутск
Alfred-Wegener-Institut für Polar und Meeresforschung,
Potsdam, Deutschland
Institut für Geologische Wissenschaften Freie Universität,
Berlin, Deutschland

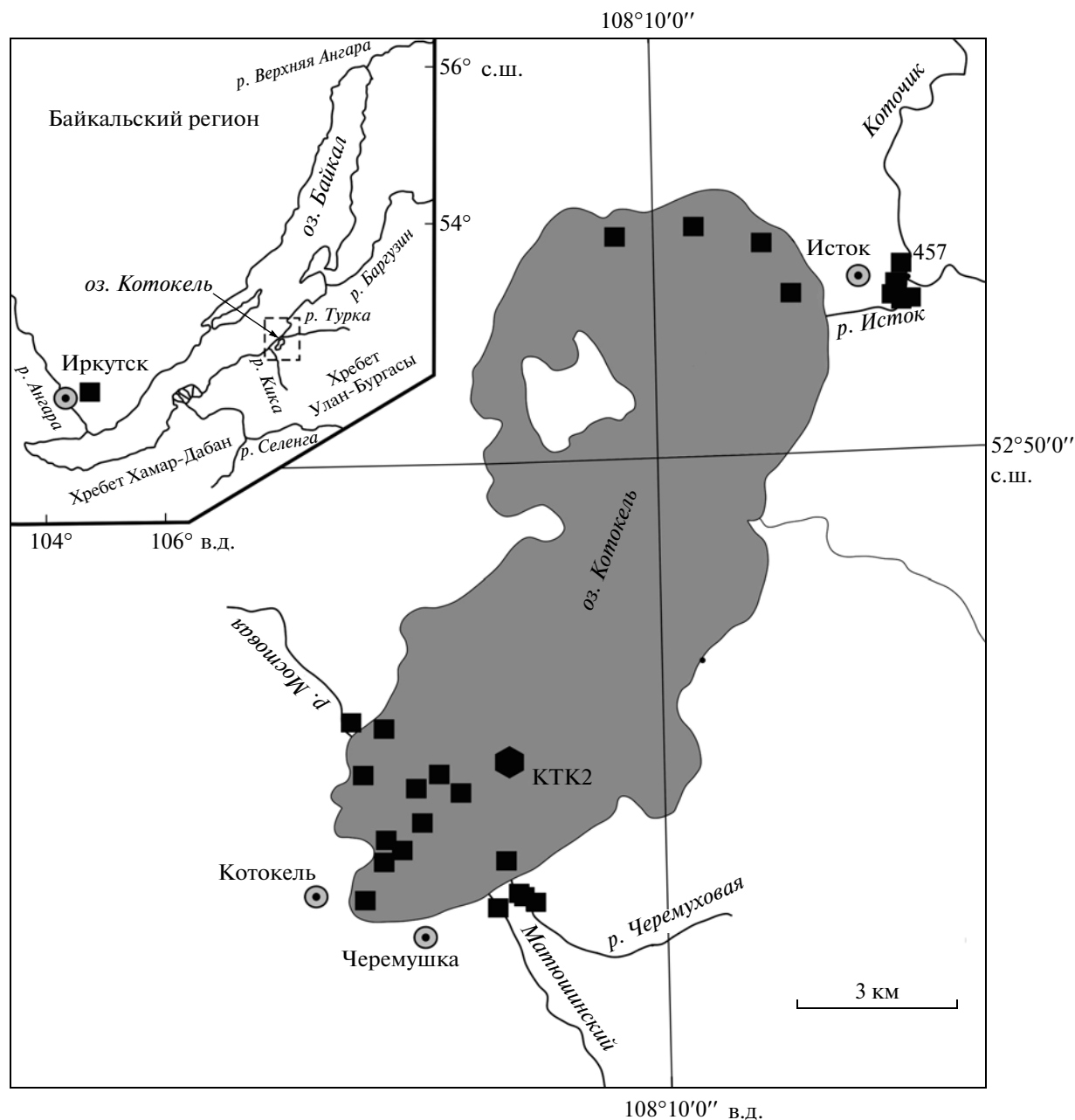


Рис. 1. Район исследований: Байкальский регион; оз. Котокель с указанием места бурения керна KTK2 (черный шестиугольник) и точек отбора образцов воды (черные квадраты).

Для оценки современных гидрологических условий и выявления факторов, контролирующих величину $\delta^{18}\text{O}$ створок, проведено исследование изотопного состава проб воды оз. Котокель, а также связанных с ним рек и сравнение полученных данных с изотопным составом атмосферных осадков Байкальского региона (образцы авторов и база данных GNIP по г. Иркутску). Изотопный анализ проб воды (рис. 1) выполнен на масс-спектрометре Finnigan MAT Delta-S (АВИ).

Ошибка определения δD и $\delta^{18}\text{O}$ (1σ) составила ± 0.8 и $\pm 0.1\text{‰}$ соответственно.

Значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD воды из оз. Котокель $10.8 - 13.7\text{‰}$ и $-101.2 - 113.9\text{‰}$ соответственно. На диаграмме соотношения величин $\delta^{18}\text{O}$ и δD (рис. 2) измеренные значения расположены правее глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) и подчиняются линейной зависимости $\delta\text{D} = 4.8\delta^{18}\text{O} - 48$ ($R^2 = 0.96$), угловой коэффициент которой удовлетворительно соответствует коэффициенту 5 для теоретически обоснованной ли-

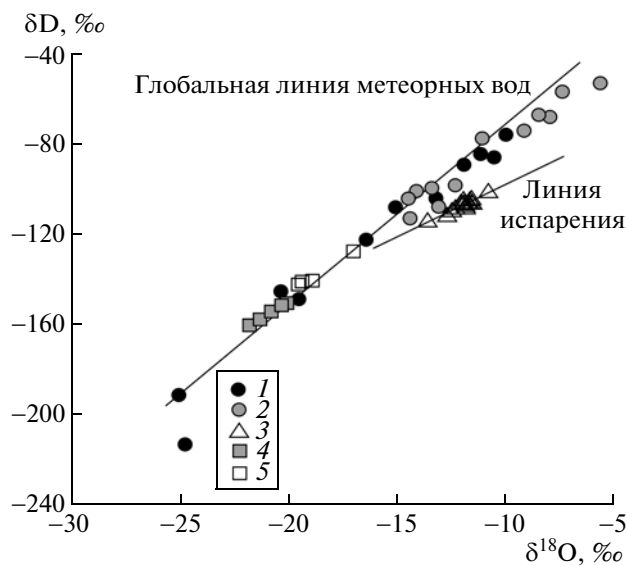


Рис. 2. Изотопный состав воды оз. Котокель, связанных с ним рек, и атмосферных осадков Байкальского региона. 1 – атмосферные осадки (база данных GNIP); 2 – дождь, г. Иркутск; 3 – вода оз. Котокель; 4 – вода рек Исток, Коточик; 5 – вода рек, впадающих в оз. Котокель.

нии испарения (ЛИ) [10]. Следовательно, полученная зависимость характеризует изотопное фракционирование, вызванное испарением. Изотопный состав метеорной воды до испарения описан точкой пересечения ЛИ и ГЛМВ. Значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD в этой точке -18.5 и -140‰ соответственно. Данные величины меньше, чем средневзвешенные значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{атм}} = -16.2$ и $\delta\text{D}_{\text{атм}} = -124.1\text{‰}$ (база данных GNIP [11]) Байкальского региона и близки к средним значениям $\delta^{18}\text{O} = -19.8$ и $\delta\text{D} = -145.9\text{‰}$, характеризующим изотопный состав речных вод, поступающих в озеро летом. Абсолютные величины $\delta^{18}\text{O}$ и δD воды рек предполагают в них существенную долю вод, образующихся за счет таяния сезонного льда и снега.

Изотопные характеристики дождевой воды (средние: $\delta^{18}\text{O} = -11$; $\delta\text{D} = -85\text{‰}$) хорошо согласуются с данными базы GNIP [11]. Значения $\delta^{18}\text{O}$ зимних осадков существенно ниже (-25‰) [11]. Это свидетельствует о зависимости величины $\delta^{18}\text{O}_{\text{атм}}$ от температуры конденсации [10]. На изотопный состав атмосферных осадков также влияет и траектория поступления влаги в регион [12]. В настоящее время атлантические воздушные массы обеспечивают Байкальский регион влагой в течение года, тогда как южные и юго-восточные циклоны активны в июле–августе [7]. При переносе влаги с океана в глубь континента происходит постепенное уменьшение значений $\delta^{18}\text{O}_{\text{атм}}$ и $\delta\text{D}_{\text{атм}}$ [10]. Очевидно, осадки, поступающие в Байкальский регион с юга-юго-востока, более обогащены изото-

пом ^{18}O по сравнению с осадками атлантического происхождения.

Проведенный анализ показал, что изменения изотопного состава воды оз. Котокель обусловлены вариациями изотопного состава атмосферных осадков, количеством талой воды, поступающей в озеро, и испарением.

Значения $\delta^{18}\text{O}$ ископаемых диатомей оз. Котокель за последние 11500 лет (здесь и далее указан календарный возраст) от 23.7 – 30.3‰ и постепенно снижаются снизу вверх по разрезу (рис. 3). Полученные величины преимущественно отражают условия цветения доминирующего в голоценовых отложениях вида *Aulacoseira granulata* (45–98%) [7], приходящиеся на летнее время, когда поверхностный слой воды прогревается до $+25^\circ\text{C}$ [13]. Постепенное снижение значений $\delta^{18}\text{O}$ створок в голоцене можно интерпретировать как тренд общего похолодания, совпадающий с общим снижением летней инсоляции в средних широтах северного полушария (рис. 3). Учитывая температурный коэффициент $+0.36\text{‰}/^\circ\text{C}$ для атмосферных осадков г. Иркутска [14], сдвиг $\delta^{18}\text{O}$ створок в 6.6‰ (рис. 3) требует снижения среднегодовой температуры воздуха Байкальского региона в голоцене на 20°C , что маловероятно. Следовательно, обусловленное снижением инсоляции похолодание климата лишь частично объясняет изменение $\delta^{18}\text{O}$ диатомей. Расшифровка полученной записи (рис. 3) требует учета и других факторов.

Изотопные данные из Китая (рис. 3) свидетельствуют об усилении летней муссонной циркуляции на востоке Азии в раннем голоцене [15]. В то же время, по данным спорово-пыльцевого анализа, влияние атлантических воздушных масс на климат Казахстана и южной Сибири было незначительным [7]. Начиная с середины голоцена, происходит перестройка атмосферной циркуляции в центральных районах Азии, связанная с ослаблением летнего муссона и усилением западного переноса воздушных масс [7]. Высокие значения $\delta^{18}\text{O}$ ископаемых диатомей оз. Котокель (рис. 3), характеризующие первую половину голоцена, свидетельствуют о менее значительном вкладе атлантических воздушных масс в водный баланс региона и увеличенной доле атмосферных осадков тихоокеанского происхождения по сравнению с современными значениями, а также о снижении запасов снега и повышенном испарении озерной воды в летнее время.

Потепление вызывает таяние снега и льда, образовавшегося в периоды похолоданий в горах бассейна оз. Котокель, и приводит к интенсивному поступлению в озеро воды с низкими значениями $\delta^{18}\text{O}$. Кратковременное снижение $\delta^{18}\text{O}$ створок 10800; 9300; 6200; 1200 лет назад, сопровождаемое увеличением концентрации диатомей (рис. 3), свидетельствует о значительном поступ-

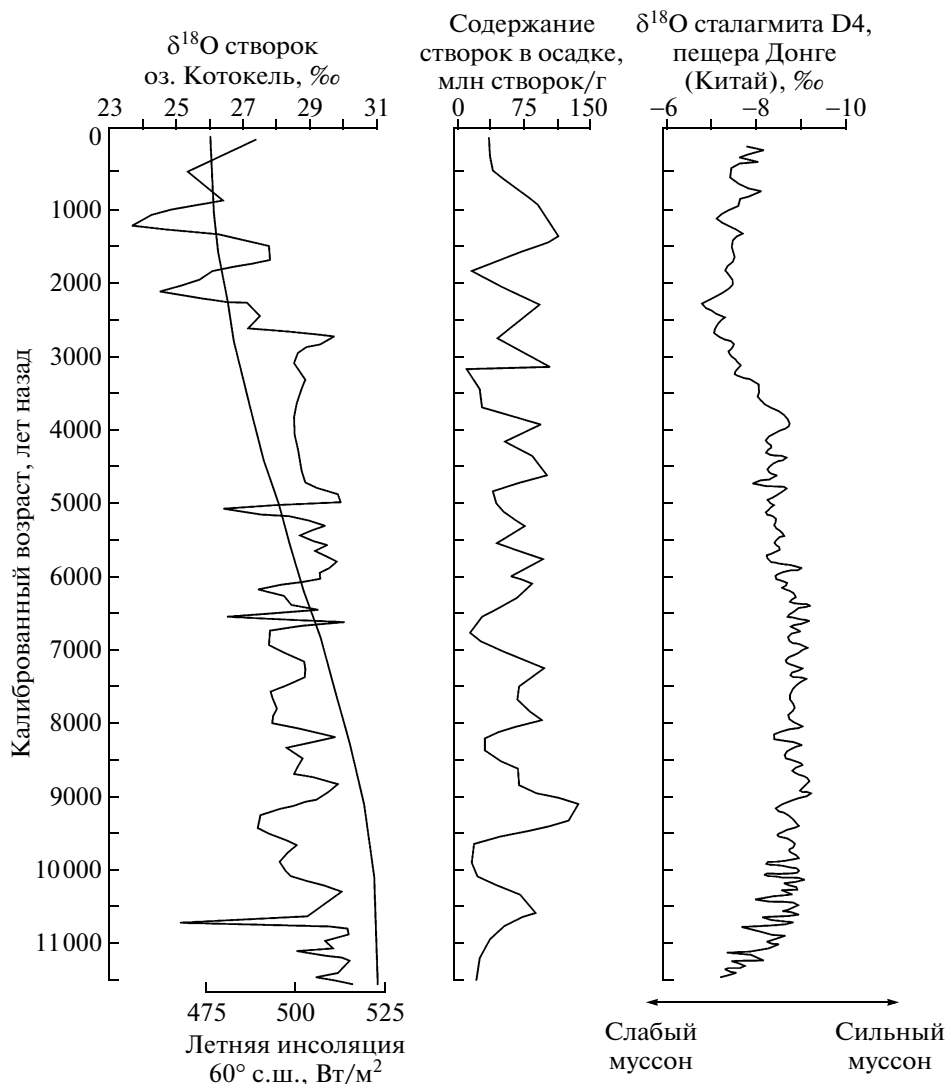


Рис. 3. Изотопный состав кислорода и общее содержание створок диатомовых водорослей в голоценовых отложениях оз. Котокель, а также кривые летней инсоляции (60° с.ш.) [7] и изотопного состава кислорода в сталагмите D4 из пещеры Донге (Китай) как индикатор активности восточноазиатского летнего муссона [15].

лении в озеро талых вод в результате повышения температуры воздуха.

Данные изотопно-кислородного анализа створок диатомовых водорослей из донных осадков оз. Котокель позволили реконструировать механизмы климатических изменений в Забайкалье в голоцене. Изменения природной среды и климата региона связаны, в первую очередь, с солнечной инсоляцией и обусловленными ею изменениями в атмосферной циркуляции, которые и определяют количество атмосферных осадков и их внутригодовое распределение. Преобладание в регионе летних атмосферных осадков приводит к утяжелению изотопного состава озерной воды и увеличению значений $\delta^{18}\text{O}$ створок, а увеличение доли снега вызывает противоположный эффект. Полученная изотопно-кислородная запись удо-

влетворительно соответствует общему ходу климатических изменений в северном полушарии и отражает сложность взаимодействия глобальных (солнечная инсоляция и атмосферная циркуляция) и локальных (испарение, сток талых вод) климатообразующих факторов на природу Забайкалья.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект РФФИ № 12–05–00476, и Германского научного фонда (DFG), проекты Me-3266-3-1, Me-3266-5-1 и TA-540-5-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин М.И., Хурсевич Г.К., Прокопенко А.А. и др. Центрические диатомовые водоросли позднего

- кайнозоя озера Байкал: морфология, систематика, стратиграфическое распределение, этапность развития (по материалам глубоководного бурения). Новосибирск: Гео, 2009. 374 с.
2. *Labeyrie L.* // *Nature*. 1974. V. 248. № 5. P. 40–42.
 3. *Swann G.E.A., Leng M.J.* // *Quatern. Sci. Rev.* 2009. V. 28. P. 384–398.
 4. *Leng M.J., Barker P.A.* // *Earth-Sci. Rev.* 2006. V. 75. P. 5–27.
 5. *Калмычков Г.В., Кузьмин М.И., Покровский Б.Г. и др.* // *ДАН*. 2007. Т. 412. № 5. С. 675–678.
 6. *Mackay A.W., Swann G.E.A., Brewer T.S., et al.* // *J. Quatern. Sci.* 2011. V. 26. № 6. P. 627–634.
 7. *Bezrukova E.V., Tarasov P.E., Solovieva N., et al.* // *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 2010. V. 296. P. 185–198.
 8. *Калмычков Г.В., Кострова С.С., Гелетий В.Ф. и др.* // *Геохимия*. 2005. № 12. С. 1358–1360.
 9. *Chapligin B., Meyer H., Friedrichsen H., et al.* // *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 2010. V. 24. P. 2655–2664.
 10. *Фоп Г.* Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 590 с.
 11. *GNIP Maps and Animations.* International Atomic Energy Agency. Vienna: IAEA, 2001. <http://iso-his.iaea.org>.
 12. *Hernandez A., Giral S., Bao R., et al.* // *J. Paleolimnol.* 2010. V. 44. P. 413–429.
 13. Биопродуктивность евтрофных озер Иркана и Котокель бассейна озера Байкал. Сб. науч. трудов ГосНИОРХ / Под ред. В.Н. Кузьмича. Л.: Промрыбвод, 1988. В. 279. 150 с.
 14. *Seal R.R., Shanks W.C.* // *Limnol. and Oceanogr.* 1998. V. 43. P. 1251–1261.
 15. *Yuan D.X., Cheng H., Edwards R.L., et al.* // *Science*. 2004. V. 304. P. 575–578.