ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2020, том 493, № 1, с. 98–102

ГЕОГРАФИЯ

УДК 551

# ОКЕНОН В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ КАК ПАЛЕОИНДИКАТОР ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЯ СОЛЕНОГО СТРАТИФИЦИРОВАННОГО ОЗЕРА

© 2020 г. Д. Ю. Рогозин[1,2,*], В. В. Зыков[1], А. О. Бульхин[2], академик РАН А. Г. Дегерменджи[1]

Поступило 21.02.2020 г.
После доработки 19.03.2020 г.
Принято к публикации 20.03.2020 г.

На основе многолетних измерений показано, что динамика седиментационного потока окенона (каротиноида пурпурных серных бактерий) отражает динамику численности пурпурных серных бактерий, содержание сероводорода и стабильность стратификации в бессточном соленом меромиктическом озере Шира. Сопоставление профилей содержания окенона в донных отложениях с динамикой уровня воды за последние ~100 лет показывает, что пики окенона совпадают по времени с периодами подъема уровня озера, тогда как спады окенона соответствуют периодам снижения либо постоянного уровня. Тем самым продемонстрировано, что окенон может использоваться не только как качественный индикатор меромиктического состояния, но и как количественный индикатор изменений уровня бессточных стратифицированных озер, что повышает достоверность палеореконструкции влажности климата в аридных климатических зонах.

*Ключевые слова:* окенон, пурпурные серные бактерии, меромиксия, уровень воды, стратификация, реконструкция палеоклимата

**DOI:** 10.31857/S2686739720070166

Бессточные озера, расположенные в аридном и полуаридном климате, чутко реагируют на изменения баланса осадков и испарения изменением объема, поэтому реконструкция динамики уровня воды таких озер по донным отложениям дает ценную информацию для реконструкции влажности климата в данной местности. В палеолимнологических исследованиях в качестве индикаторов уровня воды используются в основном косвенные признаки, отражающие изменения солености водоема, например, видовой состав диатомовых водорослей, состав хемогенных минералов (карбонаты) и т.д. Поиск новых индикаторов динамики уровня актуален для повышения точности реконструкции палеоклимата, а следовательно – для повышения надежности прогноза будущих климатических сценариев. Фотосинтетические пигменты (каротиноиды, хлорофиллы) хорошо сохраняются в донных отложениях и используются для характеристики изменений трофического статуса водоема и таксономического состава фототрофных организмов на уровне основных групп (высшие растения, зеленые водоросли, цианобактерии, диатомеи, криптофитовые и т.п.) [1]. Кроме того, каротиноиды фототрофных серных бактерий используют для выявления периодов присутствия сероводорода в водной толще, т.е. периодов меромиктического состояния водоема [2].

В настоящей работе мы проводим более детальный анализ, направленный на количественную реконструкцию динамики уровня воды в стратифицированном водоеме по содержанию каротиноида фототрофных серных бактерий в донных отложениях.

Задача палеореконструкции является существенно “обратной”, т.е. по отклику характеристик донных отложений восстанавливается характер изменений в экосистеме водоема, и в конечном итоге – климатического воздействия на экосистему. Однако для достоверной реконструкции требуется решить сначала “прямую” задачу: выяснить, как изменения в экосистеме озера отражаются на составе донных отложений. В данной работе мы решаем такую “прямую” задачу – анализируем динамику седиментационного потока окенона – специфического каротиноида пурпурных серных бактерий и сопоставляем ее с изменением режима циркуляции озера Шира (юг Сибири, Хакасия) и численностью пурпурных серных бактерий, с одной стороны, с профи-

[1] *Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярского Научного Центра, Красноярск, Россия*
[2] *Сибирский Федеральный Университет, Красноярск, Россия*
**E-mail: rogozin@ibp.ru*

лем окенона в донных отложениях озера за последние ~100 лет и динамикой уровня озера за этот же период, с другой стороны. Нами показана причинно-следственная связь между увеличением окенона в донных отложениях и периодами подъема уровня озера. Тем самым впервые получено обоснование для использования окенона в качестве палеоиндикатора не просто наличия сероводорода в фотической зоне водной толщи, но и динамики уровня в соленых стратифицированных озерах.

Озеро Шира – соленое бессточное озеро, расположенное в Северо-Минусинской котловине (юг Сибири, Республика Хакасия), в степной зоне с аридным континентальным климатом. Глубина озера в настоящее время 24 м, уровень озера непостоянный, в прошлом значительно менялся [3]. В настоящее время озеро является меромиктическим, в анаэробной зоне озера присутствуют пурпурные серные бактерии (ПСБ), осуществляющие аноксигенный фотосинтез на сероводороде и синтезирующие специфический пигмент – каротиноид окенон [4]. В подледные периоды 2015 и 2016 гг. нами было зарегистрировано полное перемешивание водной толщи (голомиксия), вызванное предположительно погодными факторами [5]. Перемешивание привело к исчезновению сероводорода из водной толщи и как следствие – снижению численности ПСБ ниже предела обнаружения [5].

Поток окенона в донные отложения измерялся во все сезоны с 2012 по 2017 гг. с помощью цилиндрических седиментационных ловушек, экспонируемых в центральной части озера на глубине 20 м (период экспозиции два месяца, подо льдом – до шести месяцев). Пробы верхних донных отложений (глубиной до 40 см) отбирались в марте 2013, 2016 и 2017 гг. с ледовой поверхности в окрестности точки установки ловушек. Для отбора проб применялся метод замораживания непосредственно на дне с помощью пробоотборника-намораживателя, созданного в Институте биофизики СО РАН по опубликованным образцам [6], в качестве хладагента использовали смесь твердой углекислоты и этанола (–80°С). Данный метод позволил получить замороженные *in situ* донные отложения с ненарушенной слоистой структурой верхних слоев, включая самый верхний слой последнего года. Сразу после извлечения со дна донные отложения транспортировали в лабораторию в замороженном состоянии в контейнерах с сухим льдом и хранили, не размораживая, в темноте в герметичных полиэтиленовых пакетах при –20°С. Для анализа вертикальных распределений окенона замороженные отложения разрезали при отрицательной температуре вдоль вертикальной оси, фотографировали с миллиметровой линейкой, затем разделяли на поперечные слайсы с помощью нихромовой проволоки, раскаленной пропускаемым через нее постоянным током. Пробы, отобранные в разные годы (2013, 2016, 2017), были приведены к единой временнóй шкале по положению характерного белого слоя, верхняя граница которого, согласно ранее опубликованной возрастной модели [7], соответствует 1938–1945 гг. (рис. 2). Содержание окенона измерялось в донных отложениях и в осадочном веществе, собранном в ловушки, методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) [8].

Динамика седиментационного потока окенона была убывающей: поток был максимальным в 2012 г. и снижался к 2017 г. (рис. 1). Сезонная динамика характеризовалась минимумами в подледный период и в целом отражала динамику численности ПСБ в озере за данный период: в 2012 г. численность ПСБ была максимальной, затем снижалась, а в 2015 г. ПСБ практически исчезли [5] и не восстановили численность до настоящего времени (рис. 1).

Профиль окенона во всех трех пробах донных отложений демонстрировал качественно сходную динамику: вблизи границы белого слоя (около 15 см, рис. 2) окенон был на низком уровне, затем выше белого слоя наблюдалось его увеличение до максимального значения, что соответствует периоду времени конца 1930–1940 гг., затем в 1950–1980 гг. наблюдался спад окенона и новый подъем в районе 2000 гг., затем спад после 2012 г. (рис. 2). Точная датировка слоев в замороженных кернах невозможна, однако, поскольку применение метода *in situ* намораживания позволило сохранить целостность верхнего слоя, можно с уверенностью утверждать, что состав верхнего слоя толщиной около 3–4 мм на границе раздела вода–осадок отражает состав седиментационных потоков предыдущих одного-двух лет. В самом верхнем слое керна 2013 г. окенона было значительно больше, чем в аналогичном слое в кернах 2016 и 2017 гг. (рис. 2), что согласуется с наблюдаемой динамикой пурпурных серных бактерий (ПСБ) в озере: в 2013 г. численность ПСБ в озере была значительной, тогда как в 2016 и 2017 гг. ПСБ были ниже предела обнаружения [5] (рис. 1). Таким образом, показано, что содержание окенона в слоях донных отложений отражает динамику численности пурпурных серных бактерий. Данный факт, а также сходство профилей окенона во всех трех кернах (рис. 2) подтверждают обоснованность полуколичественной интерпретации динамики ПСБ в озере за период последних ~ 100 лет по содержанию окенона в донных отложениях.

В свою очередь, сопоставление профиля окенона с динамикой уровня воды в озере (рис. 2) показывает, что рост содержания окенона (а следовательно – увеличение численности ПСБ) приходились на периоды подъема озера (1930–1944-е гг., 1990–2000-е гг.) и последующие несколько лет, то-

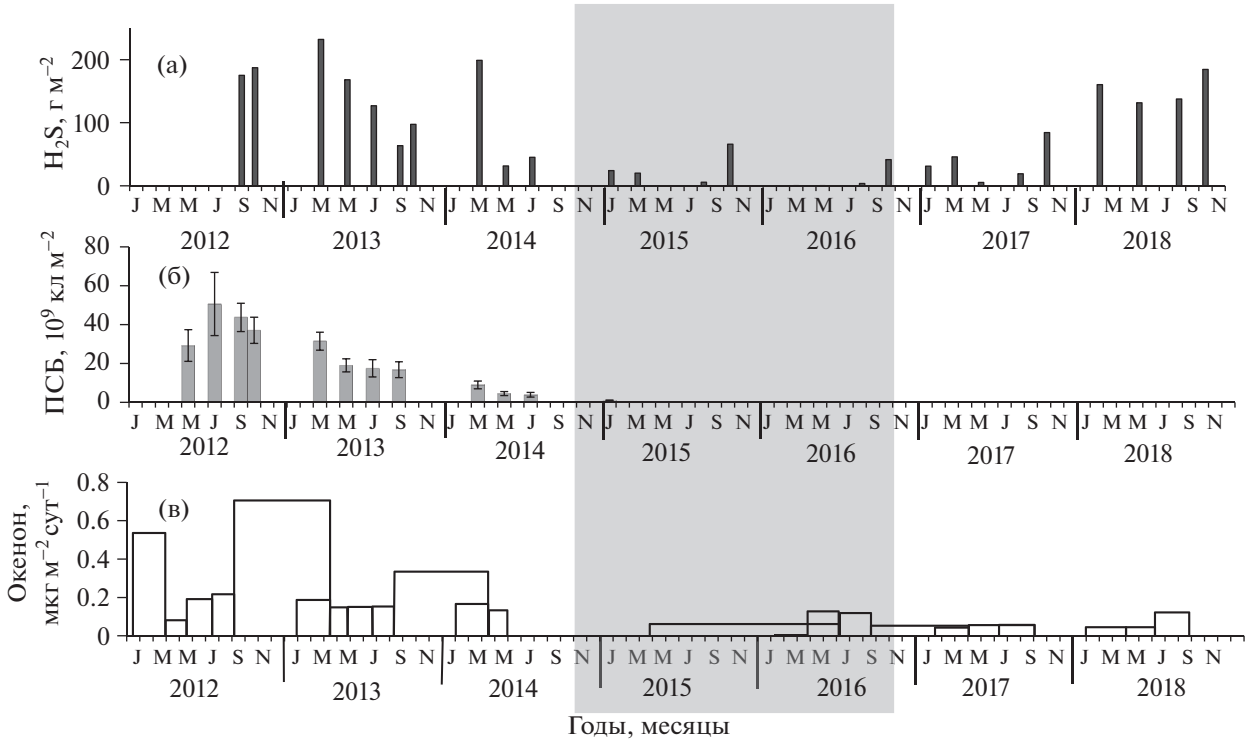


**Рис. 1.** Сезонная динамика содержания сероводорода (а), численности пурпурных серных бактерий (б) и седиментационного потока окенона (в) в оз. Шира в 2012–2018 гг. Цветом выделен период голомиксии озера.

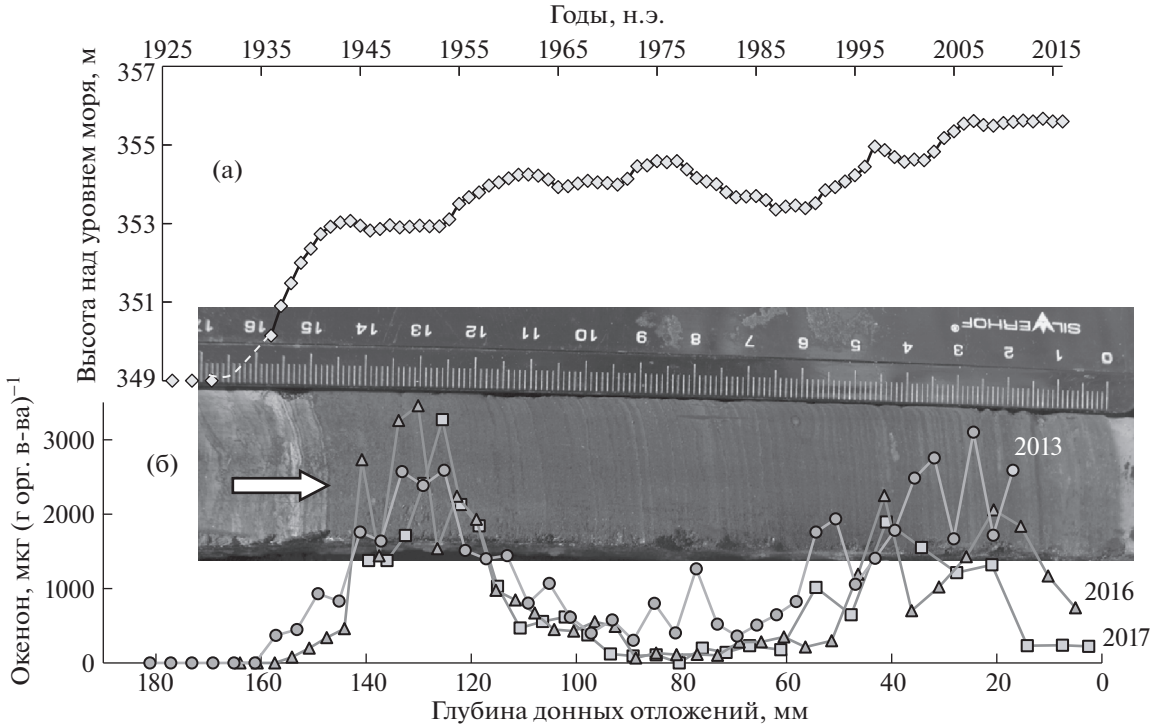


**Рис. 2.** Сопоставление динамики уровня озера Шира (а) с содержанием окенона в кернах, отобранных в 2013, 2016 и 2017 гг. (б). Приведено фото замороженного керна, отобранного в 2017 г. Стрелкой отмечена верхняя граница реперного слоя на глубине 15 см, соответствующего примерно 1938–1945 гг.

гда как спады и низкое содержание приходятся в основном на периоды снижения уровня либо длительного постоянного уровня (1960–1980-е гг.).

Ранее на собственных натурных данных нами показано, что подъем уровня в озере Шира происходит за счет поверхностного притока пресной воды (2003–2007 гг.), поэтому усиливается градиент солености, что вызывает устойчивую стратификацию (эктогенная меромиксия), в результате чего усиливается гидрофизическая стабильность в зоне хемоклина, и в придонной части (монимолимнионе) накапливается сероводород [5]. Эти факторы благоприятствуют росту ПСБ, следовательно, биомасса ПСБ увеличивается в периоды подъема озера. Напротив, в период постоянного уровня 2008–2017 гг. наблюдалось ослабление стратификации, вплоть до полного перемешивания в 2015 и 2016 гг., когда содержание сероводорода снизилось почти до нуля, и соответственно ПСБ практически исчезли [5].

Таким образом, сопоставление динамик численности ПСБ с содержанием окенона в седиментационных ловушках и верхних слоях донных отложений подтвердило, что окенон является количественным биомаркером пурпурных серных бактерий в озере Шира. С другой стороны, динамика численности ПСБ совпадает с динамикой стратификации и уровня воды в озере, как было показано ранее [5]. Следовательно, можно утверждать, что на основе натурных данных решена “прямая” задача палеолимнологии – показана причинно-следственная связь: интервалы увеличения окенона в донных отложениях отражают периоды подъема уровня озера. И наоборот, интервалы с низким содержанием окенона отражают периоды длительного постоянного уровня либо его спада (различить эти два типа динамик на основе предложенной схемы не удается). Таким образом, нами показано, что окенон является не просто качественным индикатором меромиктического состояния, как это было принято в палеолимнологии, но и полуколичественным индикатором динамики уровня в соленых стратифицированных озерах, что может быть использовано для уточнения реконструкций динамики влажности палеоклимата по более длинным кернам озера Шира, а также других соленых стратифицированных озер, расположенных в зонах с аридным климатом.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны сотрудникам Средне-Сибирского Управления по Гидрометеорологии и Мониторингу окружающей среды (г. Красноярск) за предоставленную информацию о многолетних изменениях уровня озера Шира.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19–05–00428.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Leavitt P. R.* A Review of Factors that Regulate Carotenoids and Chlorophyll Deposition and Fossil Pigment Abundance // J. Paleolimnology. 1993. V. 9. P. 109–127.

2. *Wirth S.B., Gilli A., Niemann H., Dahl T.W., Ravasi D., Sax N., Hamann Y., Peduzzi R., Peduzzi S., Tonolla M., Lehmann M.F., Anselmetti F.S.* Combining Sedimentological, Trace Metal (Mn, Mo) and Molecular Evidence for Reconstructing past Water-column Redox Conditions: The Example of Meromictic Lake Cadagno (Swiss Alps) // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2013. V. 120. P. 220–238.

3. *Degermendzhy A.G., Zadereev Y.S., Rogozin D.Y., Prokopkin I.G., Barkhatov Y.V., Tolomeev A.P., Khromechek E.B., Janse J.P., Mooij W.M., Gulati R.D.* Vertical Stratification of Physical, Chemical and Biological Components in Two Saline Lakes Shira and Shunet (South Siberia, Russia) // Aquatic Ecology. 2010. V. 44. № 3. P. 619–632.

4. *Пименов Н.В., Русанов И.И., Карначук О.Н., Рогозин Д.Ю., Брянцева И.А., Лунина О.Н., Юсупов С.К., Парначев В.В., Иванов М.В.* Микробные процессы циклов углерода и серы в озере Шира (Хакасия) // Микробиология. 2003. Т. 72. № 2. С. 259–267.

5. *Rogozin D.Y., Tarnovsky M.O., Belolipetskii V.M., Zykov V.V., Zadereev E.S., Tolomeev A.P., Drobotov A.V., Barkhatov Y.V., Gaevsky N.A., Gorbaneva T.B., Kolmakova A.A., Degermendzhi A.G.* Disturbance of Meromixis in Saline Lake Shira (Siberia, Russia): Possible Reasons and Ecosystem Response // Limnologica. 2017. V. 66. P. 12–23.

6. *Renberg I., Hansson H.* A Pump Freeze Corer for Recent Sediments // Limnology and Oceanography. 1993. V. 38. № 6. P. 1317–1321.

7. *Kalugin I., Darin A., Rogozin D., Tretyakov G.* Seasonal and Centennial Cycles of Carbonate Mineralisation during the Past 2500 Years from Varved Sediment in LakeShira, South Siberia // Quaternary International. 2013 V. 290–291. P. 245–252.

8. *Зыков В.В., Рогозин Д.Ю., Калугин И.А., Дарьин А.В., Дегерменджи А.Г.* Каротиноиды в донных отложениях меромиктического озера Шира (Россия, Хакасия) как палео-индикатор для реконструкции состояний озера // Сибирский экологический журнал. 2012. № 4. С. 585–595.

# OKENONE IN LAKE SEDIMENTS AS A PROXY OF WATER SURFACE LEVEL OF SALINE STRATIFIED LAKE

**D. Y. Rogozin[a,b,#], V. V. Zykov[a], A. O. Bulkhin[b], and Academician of the RAS A. G. Degermendzhi[a]**

[a] *Institute of Biophysics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk National Center, Krasnoyarsk, Russian Federation*

[b] *Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation*

[#] *E-mail: rogozin@ibp.ru*

On the basis of multi-year measurements we have shown that sedimentation rate of okenone (carotenoid of purple sulphur bacteria) reflected the abundance of purple sulphur bacteria, hydrogen sulphide content and stratification stability in closed-basin saline meromictic lake Shira (south Siberia, Russia). The profile of fossil okenone in lake sediments was compared with the record of water surface level of the lake for the last 100 years. The peaks of okenone corresponded to the transgressions of the lake whereas the low okenone intervals corresponded to the periods of stable level or level decreases. Our observations show that fossil okenone can be used not only as qualitative proxy of meromictic conditions but as a proxy of water level dynamics of stratified lakes. Therefore, okenone can be used for qualitative reconsrtructions of water balance and climate humidity in arid climate zones.

*Keywords:* okenone, purple sulphur bacteria, meromixis, water level, stratification, climate reconstruction