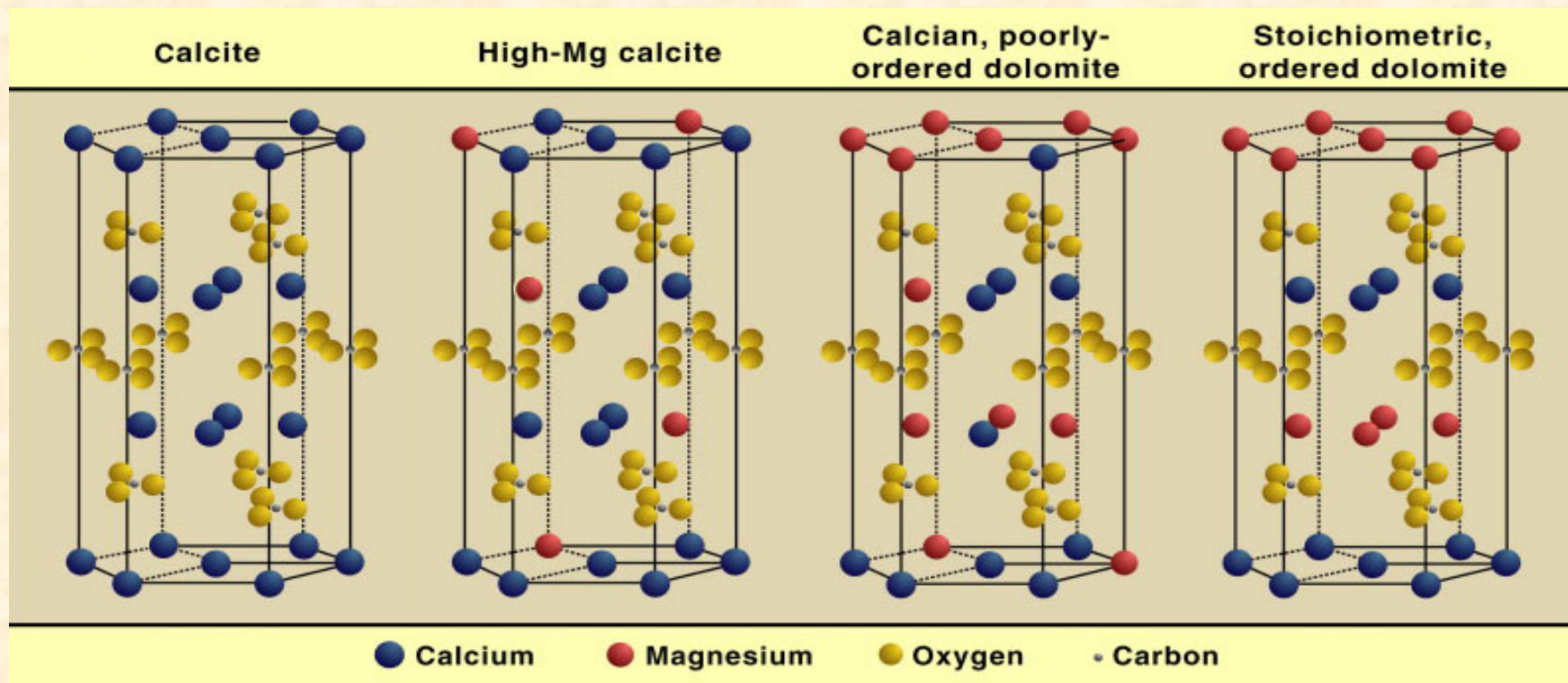


# НОВАЯ КЛИМАТИЧЕСКАЯ ЛЕТОПИСЬ ГОЛОЦЕНА ИЗ КАРБОНАТНЫХ ОСАДКОВ МАЛОГО СОЛЕННОГО ОЗЕРА ВЕРХНЕЕ БЕЛОЕ (ЗАПАДНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)



Э.П. Солотчина<sup>1</sup>, Е.В. Скляр<sup>2</sup>, П.А. Солотчин<sup>1</sup>, Е.Г. Вологина<sup>2</sup>,  
О.А. Склярова<sup>3</sup>, Н.Н. Ухова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева, Новосибирск,

<sup>2</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск

<sup>3</sup>Институт геохимии СО РАН им. А.П. Виноградова, Иркутск

## Цель – получение палеоклиматических летописей из голоценовых карбонатных осадков малых соленых озер Байкальского региона.

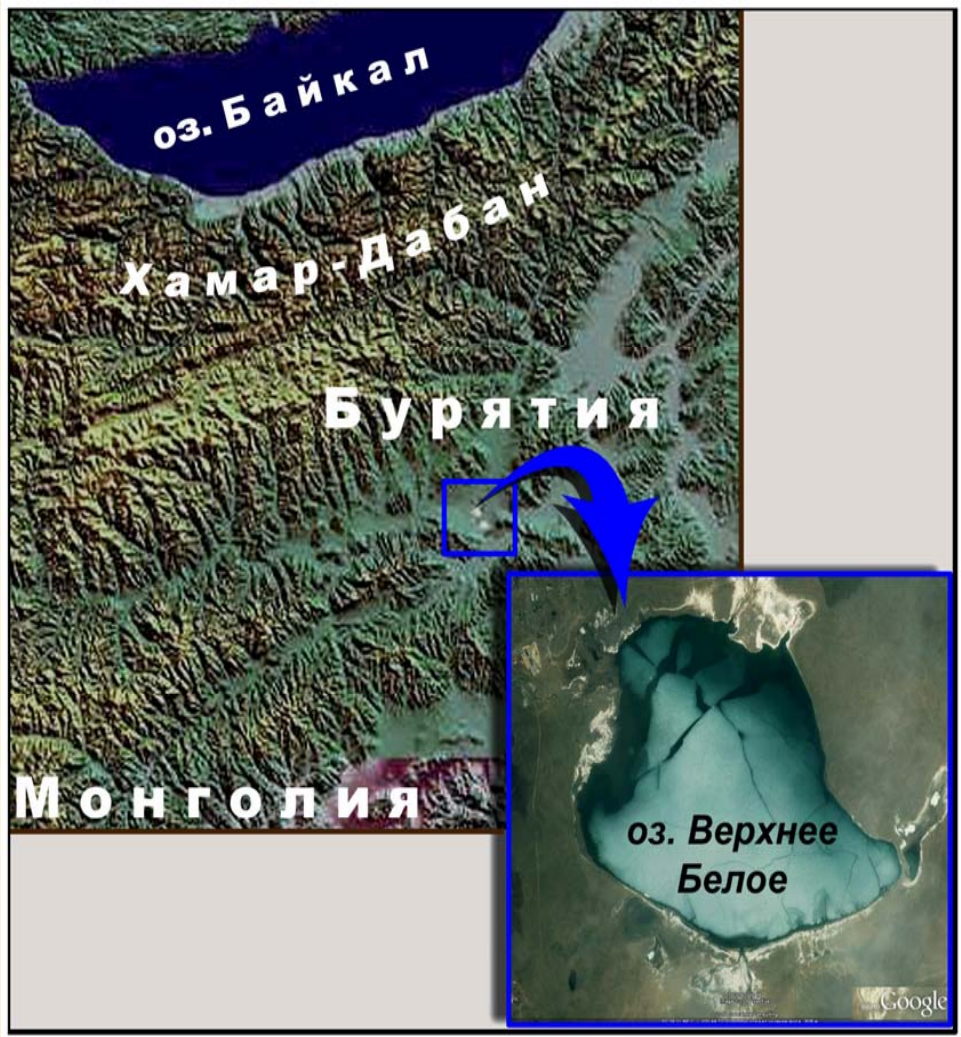
В условиях резкого изменения климата на планете особую значимость приобретают исследования климата прошедших эпох, поскольку именно в прошлом следует искать ответы на поставленные перед человечеством вопросы, ибо «прошлое – лучший пророк будущего». “The best prophet of the future is the past” (G. Byron, 1821).



Детальная запись изменений климата голоцена, полученная на основе выявления ассоциаций хемогенных карбонатов, их кристаллохимических и структурных особенностей, последовательности формирования, сопоставляется с результатами определения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$ , геохимией макро- и микроэлементов, с данными лазерной гранулометрии и др.).

Оз. Верхнее Белое расположено в южной части Боргойского сухостепного района (Джидинская котловина, Западное Забайкалье). Площадь водного зеркала составляет по разным оценкам от 3 до 4,5 км<sup>2</sup>, средняя глубина 0,85 м, максимальная – 2,7 м.

Воды озера относятся к сульфатно-гидрокарбонатно-натриевому типу, минерализация – 22, 25 г/л, pH=9,8.

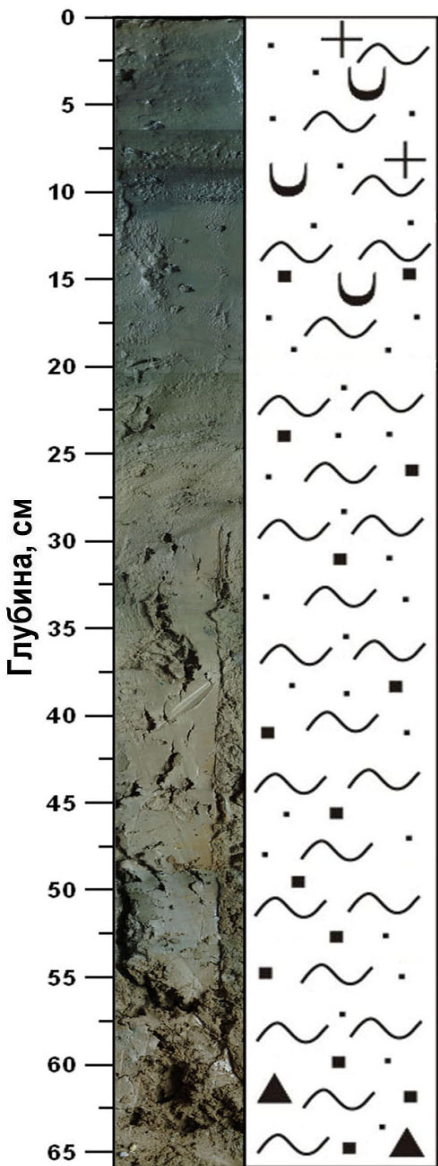


| Ионный состав воды                  | Содержание, мг/л (зима) |
|-------------------------------------|-------------------------|
| $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ | 10626                   |
| $\text{SO}_4^{2-}$                  | 3100                    |
| $\text{Cl}^-$                       | 1826                    |
| $\text{Na}^+$                       | 6580                    |
| $\text{Mg}^{2+}$                    | 43,17                   |
| $\text{Ca}^{2+}$                    | 31.80                   |

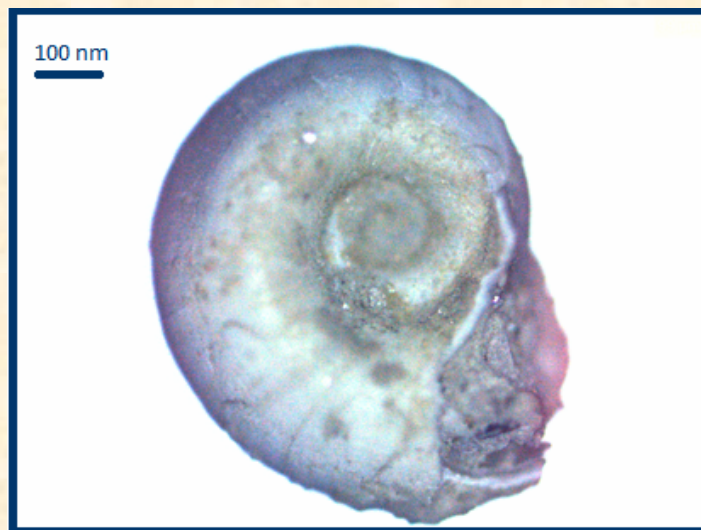
**Керн получен бурением со льда  
(Институт земной коры СО РАН).**



Литологическая  
колонка



Осадки оз. Верхнее Белое вскрыты на глубину 66 см. По ряду литологических признаков в керне выделены две зоны, граница между ними приурочена к гл. 22 см. Нижняя зона (22-66 см) - плотные алевритистые глины, постепенно вверх по разрезу переходящими в алевропелит и глинистый алеврит. Осадки содержат примесь крупнозернистого песчаного материала, а в основании разреза – отдельные обломки гравийной размерности. Верхняя зона (0-22 см) представлена глинисто-алевроитовыми отложениями, присутствуют створки раковин моллюсков и диатомей.



В верхнем интервале гл. 9-10 см – раковина гастропод **Anisus sp.** Хорошее состояние раковин и отсутствие экзотов позволяют считать, что их захоронение происходило при климате, близком к современному.

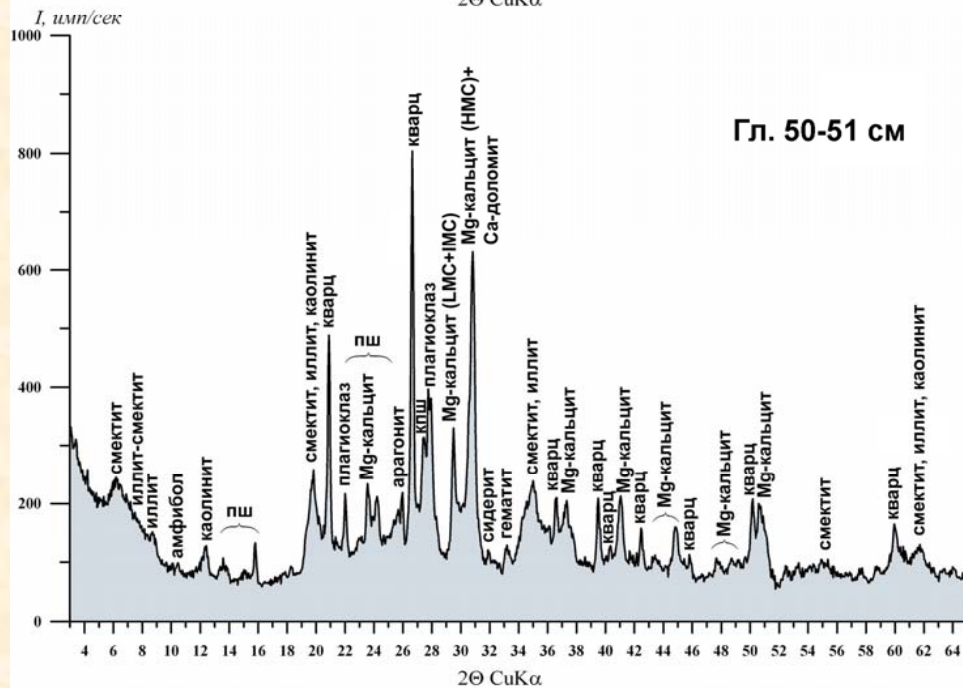
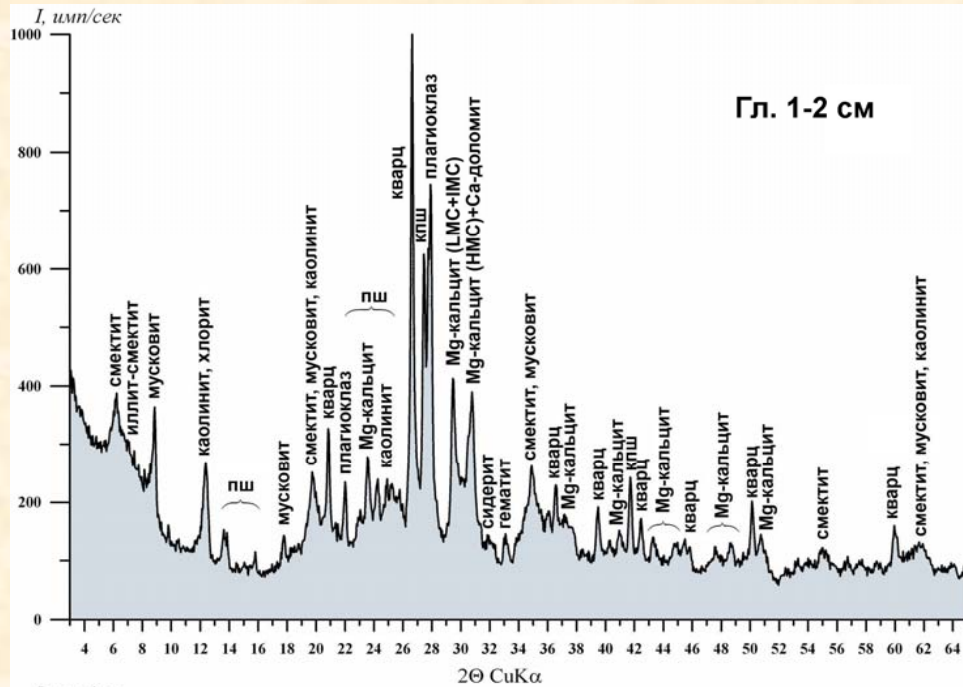
- |  |   |  |   |  |   |
|--|---|--|---|--|---|
|  | 1 |  | 2 |  | 3 |
|  | 4 |  | 5 |  | 6 |

1 - пелит, 2 – алеврит, 3 – песок, 4 – гравий, 5 – диатомеи, 6 – раковины моллюсков.

# Методы исследования

- Керна датирован по карбонатному материалу радиоуглеродным методом AMS (ЦКП «Геохронология кайнозоя» СО РАН, Новосибирск).
- Изучение минерального состава осадков, кристаллохимии карбонатов проводилось методами рентгеновской дифрактометрии (дифрактометр ARL X'TRA, излучение Cu K $\alpha$ , ИГМ СО РАН).
- Для количественного определения суммарного содержания карбонатов использовалась ИК спектроскопия (спектрометр Specord 75 IR, ИГМ СО РАН).
- Электронно-микроскопические исследования были проведены на сканирующем микроскопе LEO 1430 VP (ИГМ СО РАН).
- Гранулометрический состав образцов определялся на лазерном микроанализаторе частиц Analysette 22 Micro Tec (ИГМ СО РАН).
- Анализ стабильных изотопов  $^{18}\text{O}$  и  $^{13}\text{C}$  в карбонатах был выполнен на масс-спектрометре Finnigan MAT 253 (ИГМ СО РАН).
- Элементный анализ осадков проводился методом РФА СИ (Сибирский центр синхротронного излучения (ИЯФ СО РАН) и методом атомной абсорбции на спектрофотометрах SOLAAR-M6 и AAS (ИЗК СО РАН).

## XRD спектры донных осадков оз. Верхнее Белое

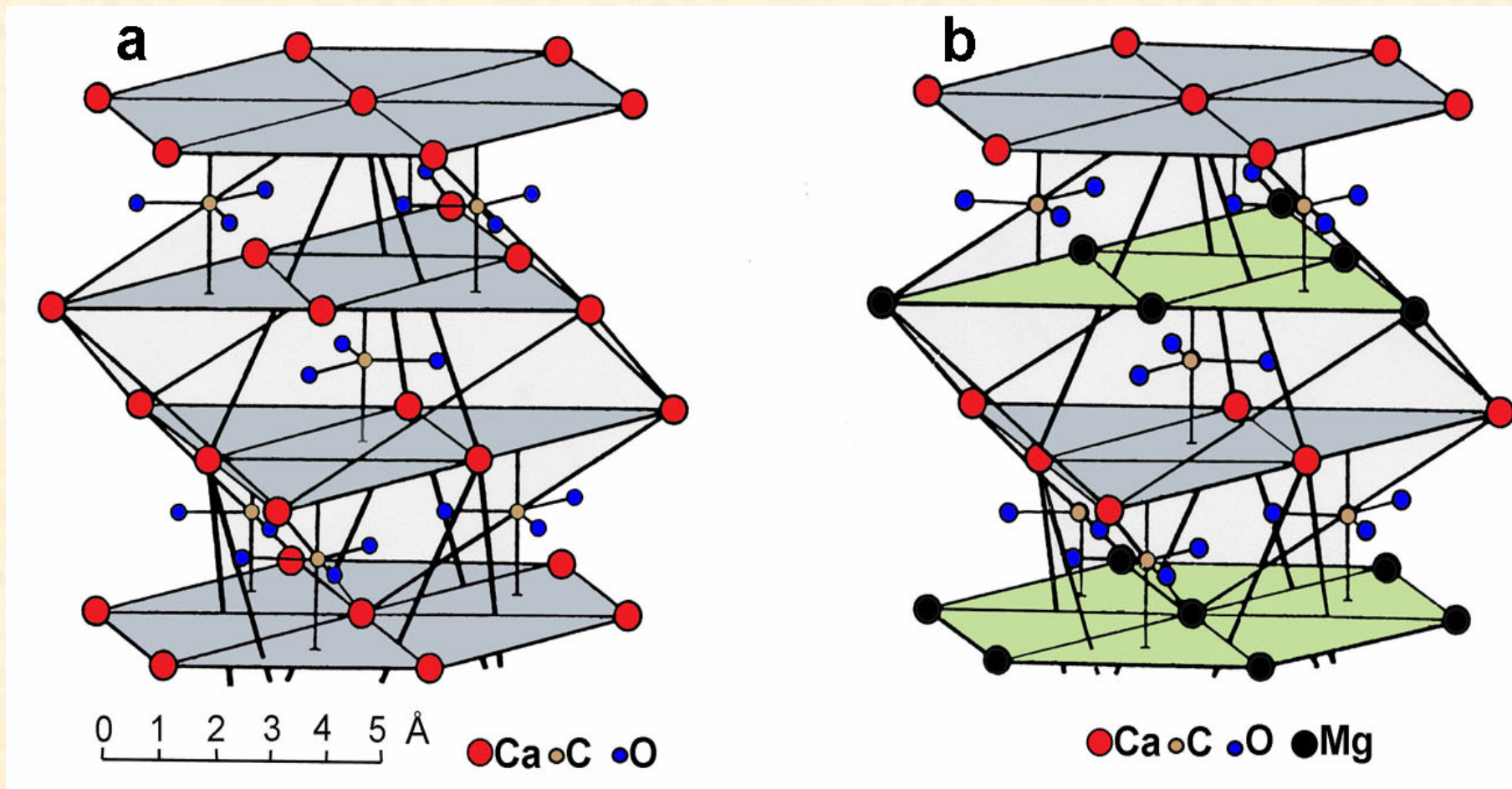


1. В осадках доминируют терригенные минералы, среди которых преобладают кварц, плагиоклаз и калиевый полевой шпат, в подчиненных количествах присутствуют слоистые силикаты, в числе которых смектит, иллит, иллит-смектит, мусковит, каолинит, хлорит, эпизодически встречаются гематит, сидерит, изредка амфибол.

2. Доля карбонатов в большинстве образцов составляет около 20% от минерального состава осадка (максимум содержания ~25% в средней части разреза и минимум ~15% в его подошве и кровле).

3. Ансамбль хемогенных карбонатных минералов представлен Мг-кальцитами разной степени магнезиальности, Са-избыточными доломитами и на отдельных интервалах арагонитом.

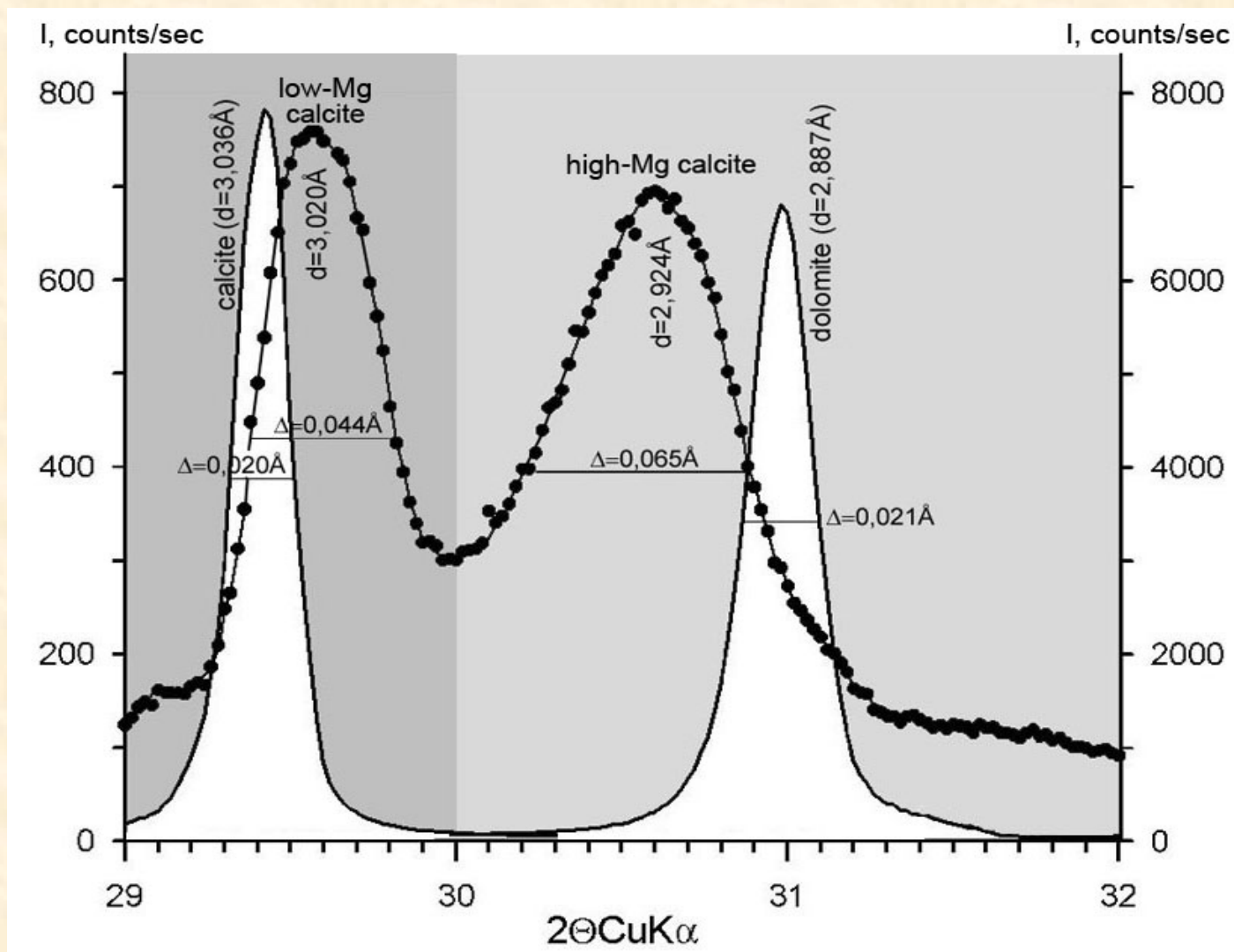
# Кристаллическая структура тригональных безводных карбонатов



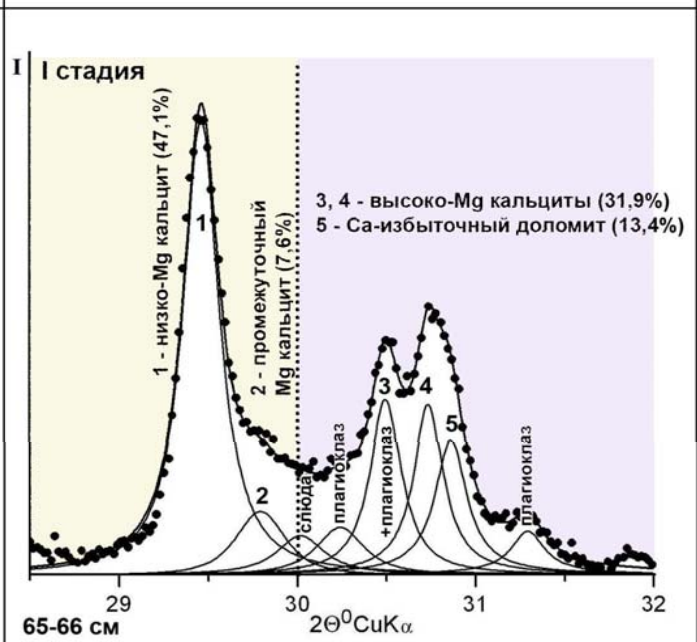
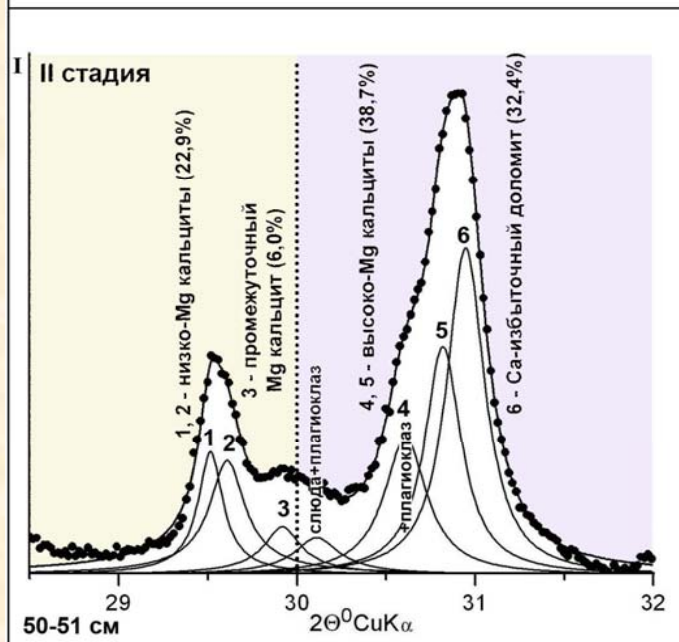
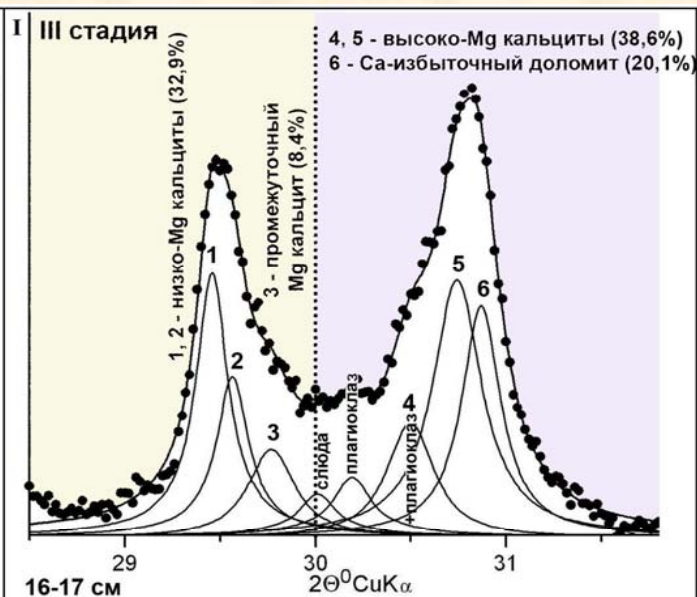
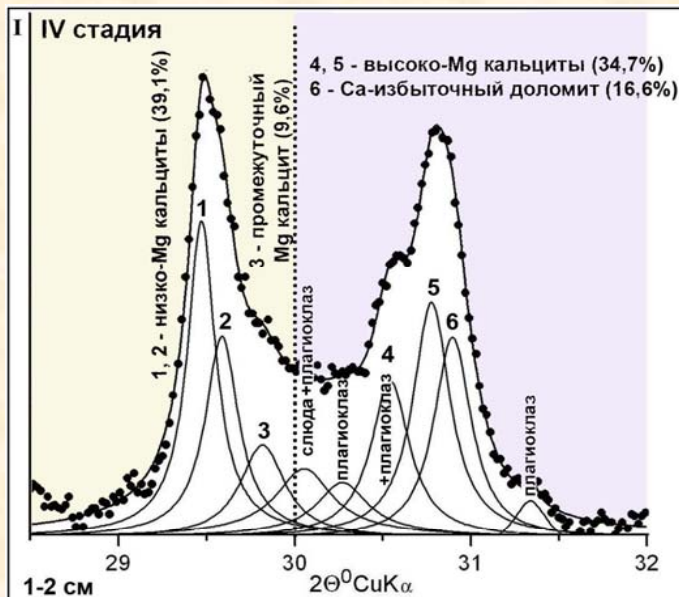
**a** – кальцит  $\text{CaCO}_3$  (R-3C) and **b** – стехиометрический доломит  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  (R-3) в гексагональной установке. В кальците все катионы Ca структурно эквивалентны, в доломите позиции Ca в каждом втором слое заняты Mg. Слои катионов чередуются с карбонатными слоями, образованными структурными единицами групп  $\text{CO}_3$ . В структуре Mg-кальцитов ионы Ca и Mg беспорядочно распределены по катионным позициям, что сопровождается позиционным беспорядком анионной группы  $\text{CO}_3$ .



# XRD профили ( $hkl=104$ ) кальцита, стехиометрического доломита и низкотемпературных разупорядоченных Mg-кальцитов



# РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ XRD ПРОФИЛЕЙ КАРБОНАТОВ ОСАДКОВ ОЗ. ВЕРХНЕЕ БЕЛОЕ ФУНКЦИЕЙ ПИРСОНА VII



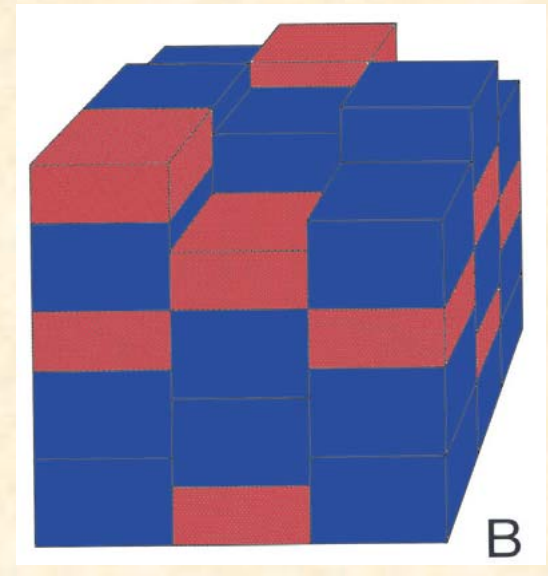
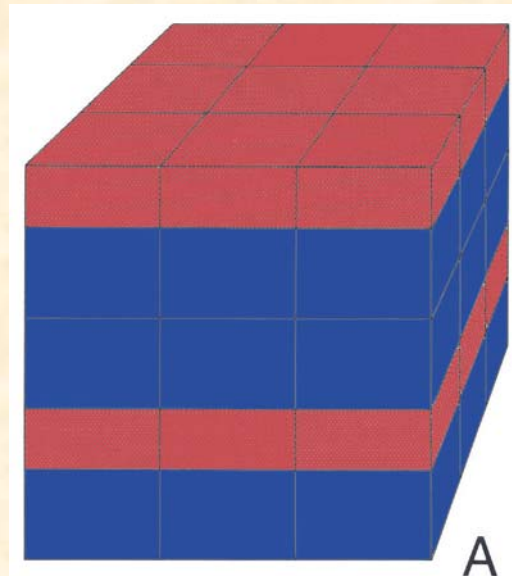
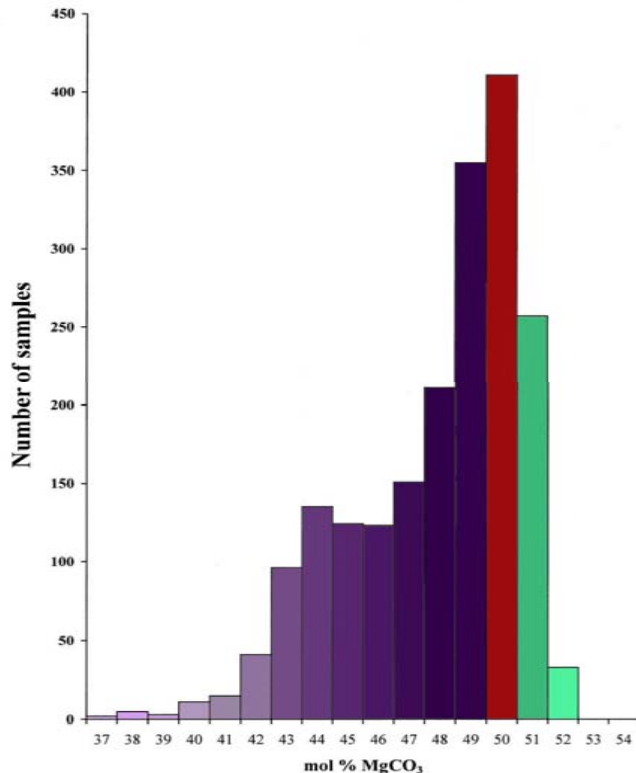
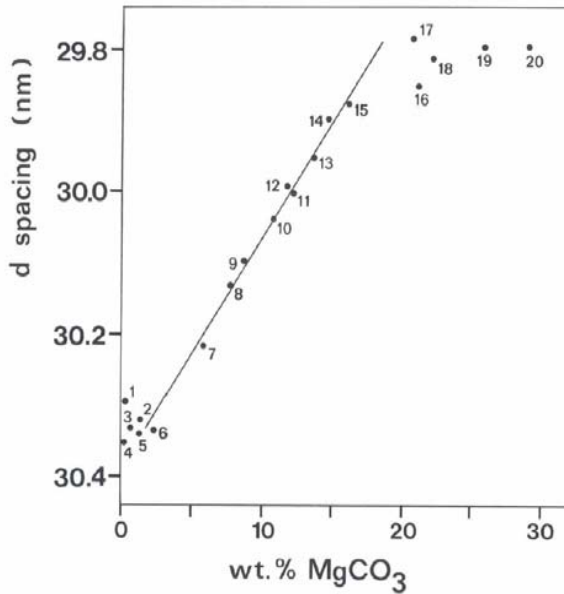
Для выявления всего спектра карбонатных минералов нами использовалось разложение их сложных XRD-профилей на индивидуальные пики функцией Пирсона VII. Моделирование XRD профилей карбонатов показало, что в образцах присутствуют 5–6 карбонатных фаз, соотношение которых меняется вдоль разреза. Разрыв между низко- и высоко-Mg кальцитами –  $30^{\circ}2\theta^{\circ}\text{CuK}\alpha$  ( $d_{104} = 2,98\text{Å}$ ).

## Современные представления о структуре Mg-кальцитов и Ca-избыточных доломитов

Mg-кальциты представляют собой истинные твердые растворы лишь до концентрации  $\text{MgCO}_3 < 18$  мол.%. Существует линейная зависимость между  $d_{104}$  и содержанием  $\text{MgCO}_3$  в структуре (закон Вегарда).

Mg-кальциты с содержанием  $\text{MgCO}_3 > 18$  мол.% являются смешанными кристаллами, структура которых представляют собой последовательности кальцитовых и магнезитовых слоев, чередующихся с разной степенью порядка, образуя домены нанометрической размерности.

Ca-избыточные доломиты имеют смешанослойную структуру, более близкую структуре Mg-кальцитов, чем стехиометрическому доломиту *sensu stricto*.



A - упорядоченная структура;  
B - доменная структура

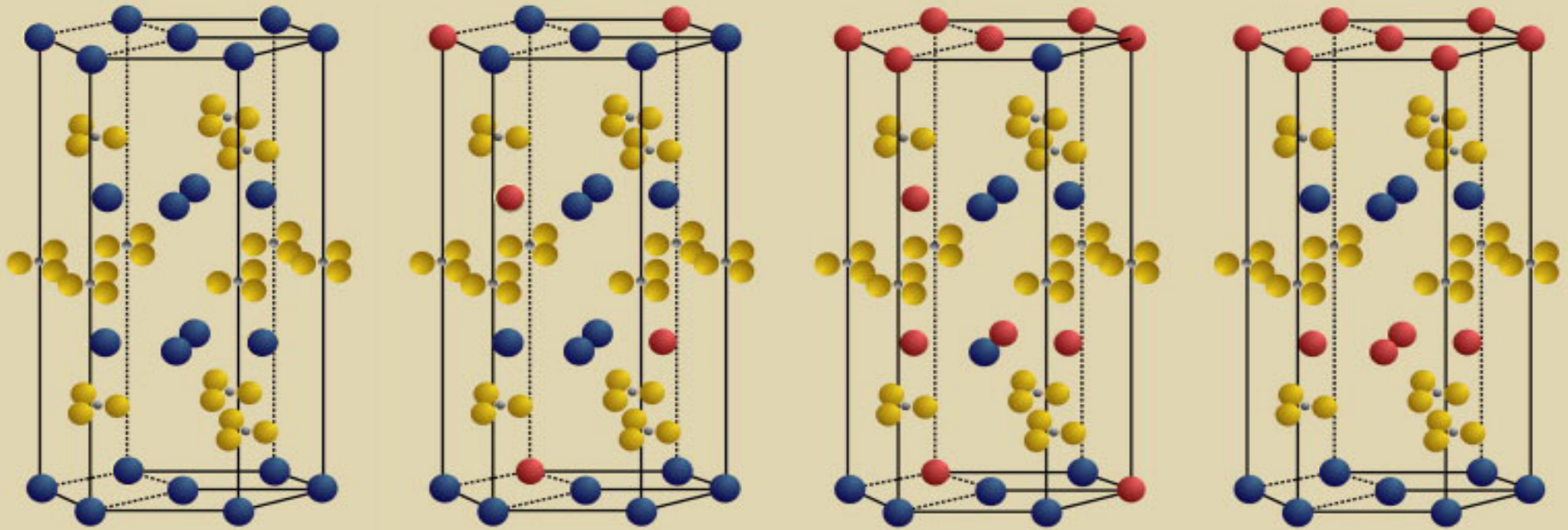
# Структуры карбонатных минералов кальцит- доломитового ряда

Calcite

High-Mg calcite

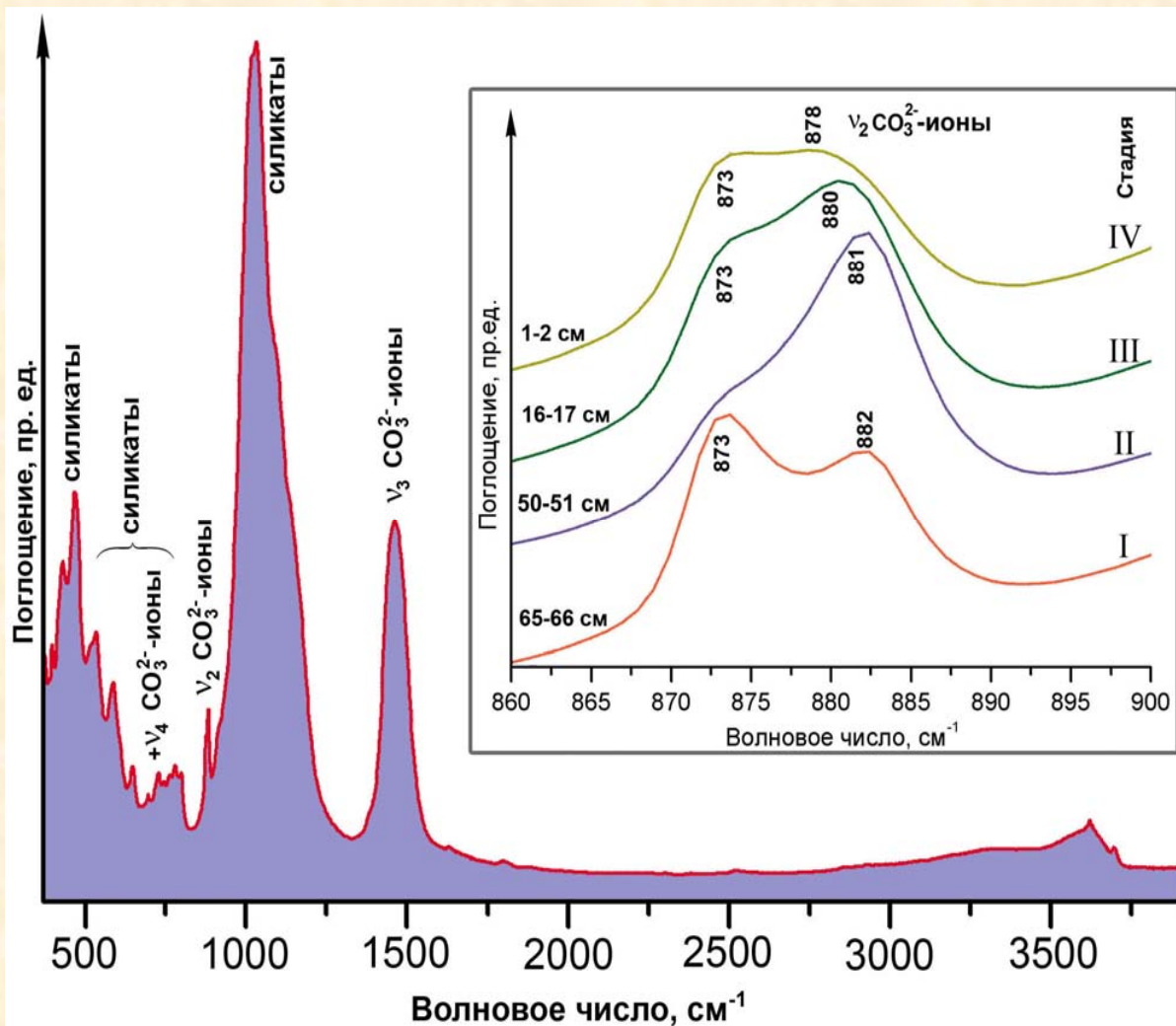
Calcian, poorly-  
ordered dolomite

Stoichiometric,  
ordered dolomite



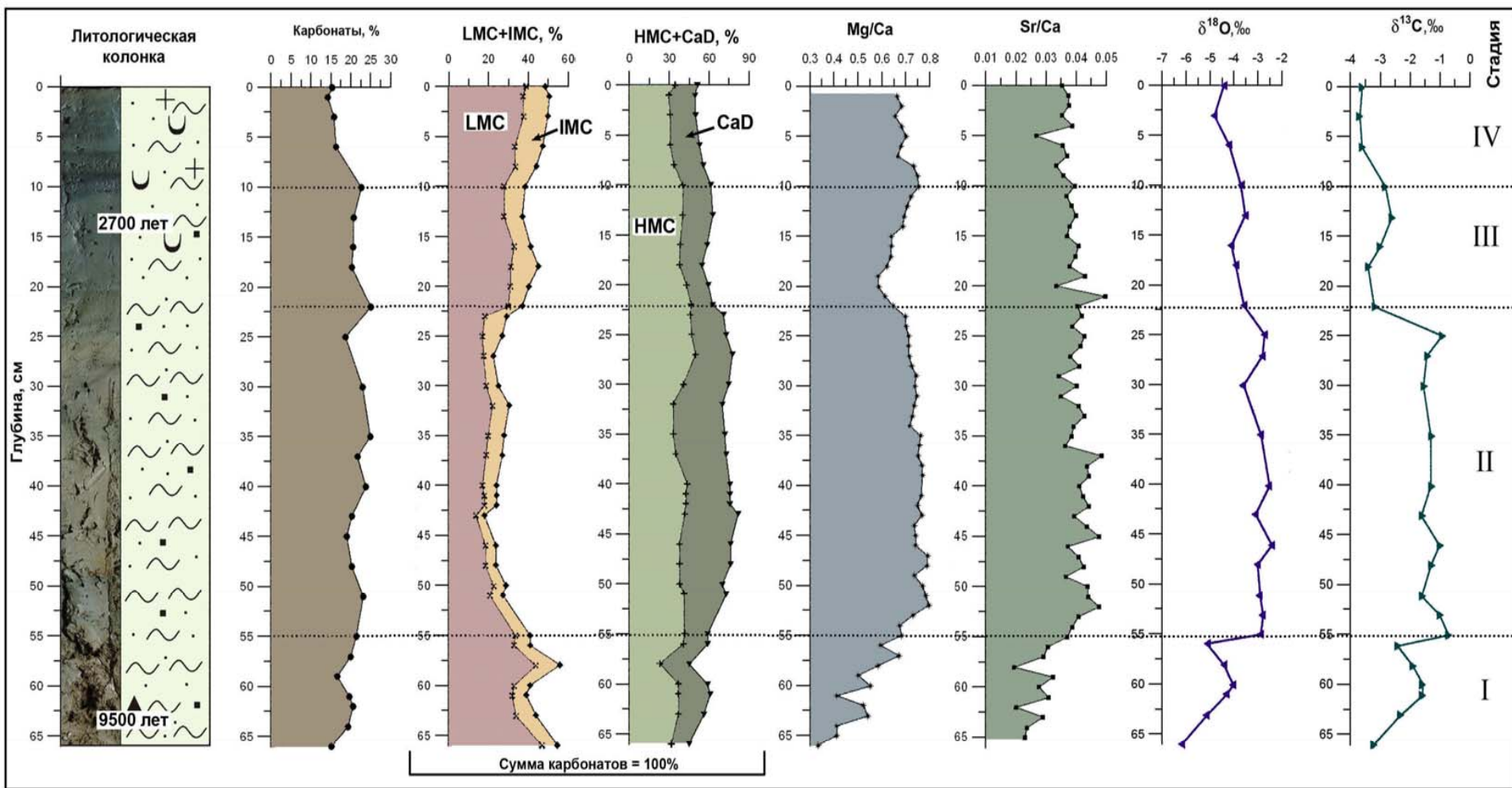
● Calcium    ● Magnesium    ● Oxygen    ● Carbon

# ИК-СПЕКТРЫ КАРБОНАТОВ КАЛЬЦИТ-ДОЛОМИТОВОГО РЯДА ОЗ. ВЕРХНЕЕ БЕЛОЕ

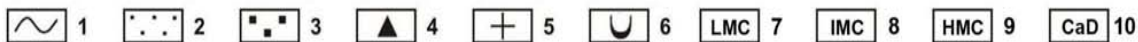


Карбонаты характеризуются тремя основными полосами поглощения  $\nu_3$ ,  $\nu_2$  и  $\nu_4$  с максимумами для конечных членов – кальцита и доломита – вблизи частот 1430, 876, 713 см<sup>-1</sup> и 1440, 882, 729 см<sup>-1</sup>, соответственно. Соотношение интенсивностей компонентов полосы  $\nu_2$  служит мерой содержания в образце той или иной карбонатной фазы.

# Распределение в осадочном разрезе оз. Верхнее Белое карбонатов, геохимических индикаторов палеоклиматических изменений (отношения Mg/Ca и Sr/Ca), стабильных изотопов ( $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$ )



Условные обозначения:



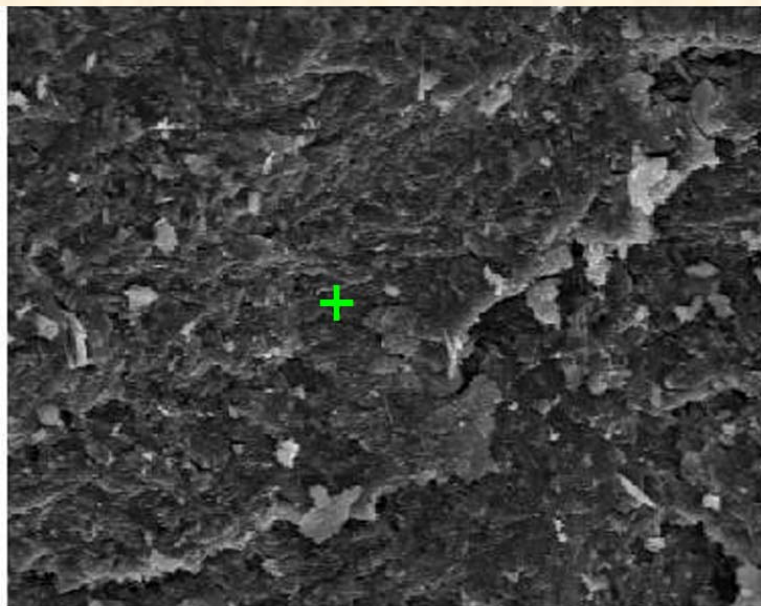
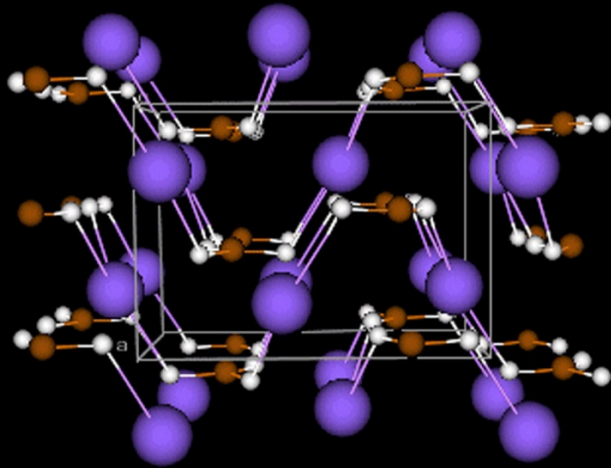
1- пелит, 2 - алеврит, 3 - песок, 4 - гравий, 5 - диатомеи, 6 - раковины моллюсков, 7 - низко-Mg кальцит, 8 - промежуточный Mg кальцит, 9 - высоко-Mg кальцит, 10 - Ca-избыточный доломит

## Параметры модельных XRD профилей карбонатов образцов осадков оз. Верхнее Белое

|                                    | Глубина,<br>см | Карбонаты                | № линии | Содержание |                              |
|------------------------------------|----------------|--------------------------|---------|------------|------------------------------|
|                                    |                |                          |         | фазы,<br>% | MgCO <sub>3</sub> ,<br>мол.% |
| <b>СТАДИЯ II</b><br>Аридный климат | 50-51          | Низко-Mg кальцит         | 1       | 9.6        | 2.5                          |
|                                    |                |                          | 2       | 13.3       | 5.0                          |
|                                    |                | Промежуточный Mg кальцит | 3       | 6.0        | 17.0                         |
|                                    |                |                          | 4       | 15.9       | 31.2                         |
| Высоко-Mg кальцит                  | 5              | 22.8                     | 40.0    |            |                              |
|                                    | 6              | 32.4                     | 47.5    |            |                              |
| <b>СТАДИЯ I</b><br>Гумидный климат | 65-66          | Низко-Mg кальцит         | 1       | 47.1       | 0.75                         |
|                                    |                |                          | 2       | 7.6        | 12.0                         |
|                                    |                | Высоко-Mg кальциты       | 3       | 16.2       | 33.0                         |
|                                    |                |                          | 4       | 15.7       | 41.5                         |
| Са-избыточный доломит              | 5              | 13.4                     | 43.5    |            |                              |

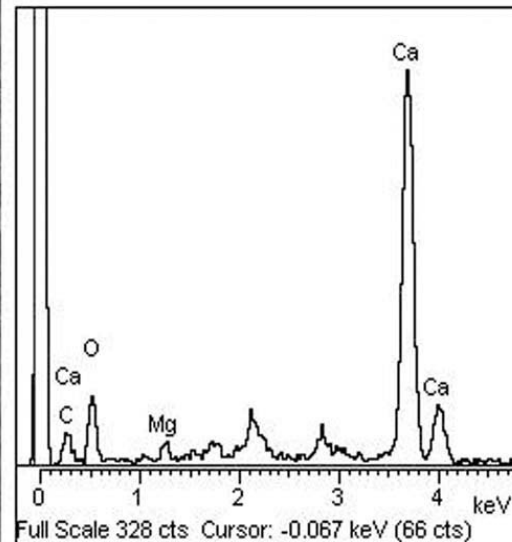
## Aragonite

**Арагонит  $\text{CaCO}_3$**  (орторомбическая симметрия) - вторая менее распространенная полиморфная модификация карбоната кальция. Арагонит и формируется в более узком диапазоне физико-химических условий. Этот минерал метастабилен по сравнению с кальцитом, часто преобразуется в кальцит. Преимущественному осаждению арагонита в сравнении с кальцитом благоприятствуют повышенные концентрации в воде ионов  $\text{Mg}^{2+}$ , которые, сорбируясь на поверхности зародышей кальцита, блокируют их рост. Особенности структуры арагонита таковы, что адсорбция ионов  $\text{Mg}^{2+}$  незначительна.



60µm

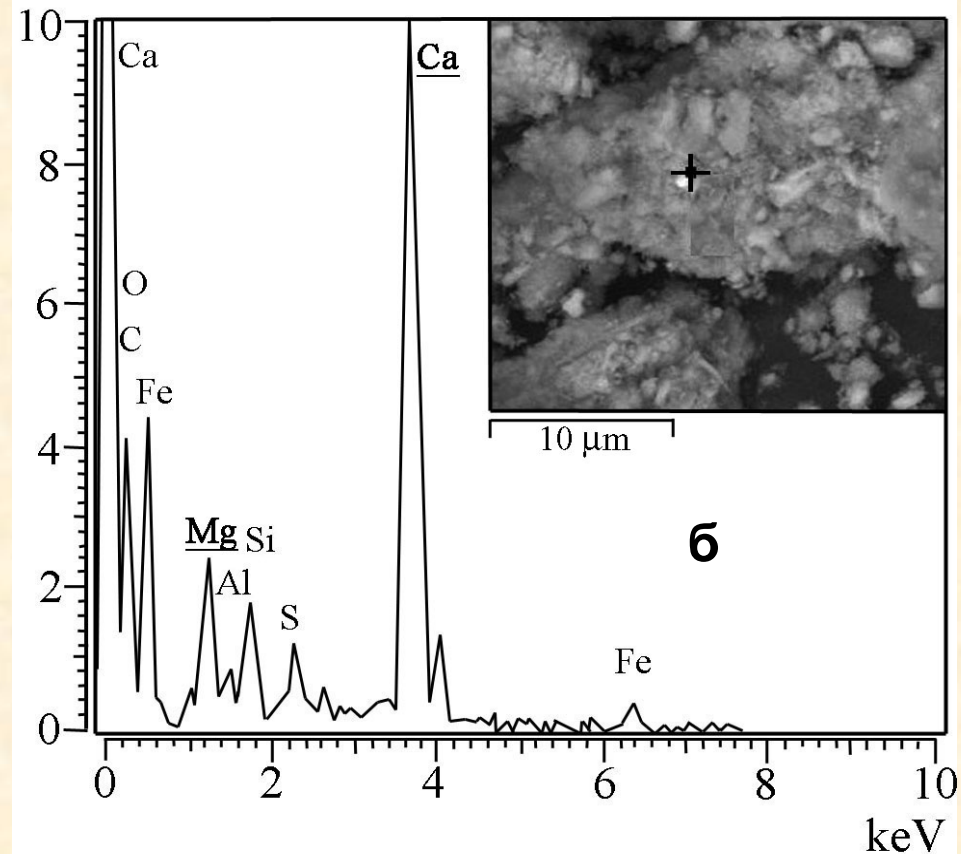
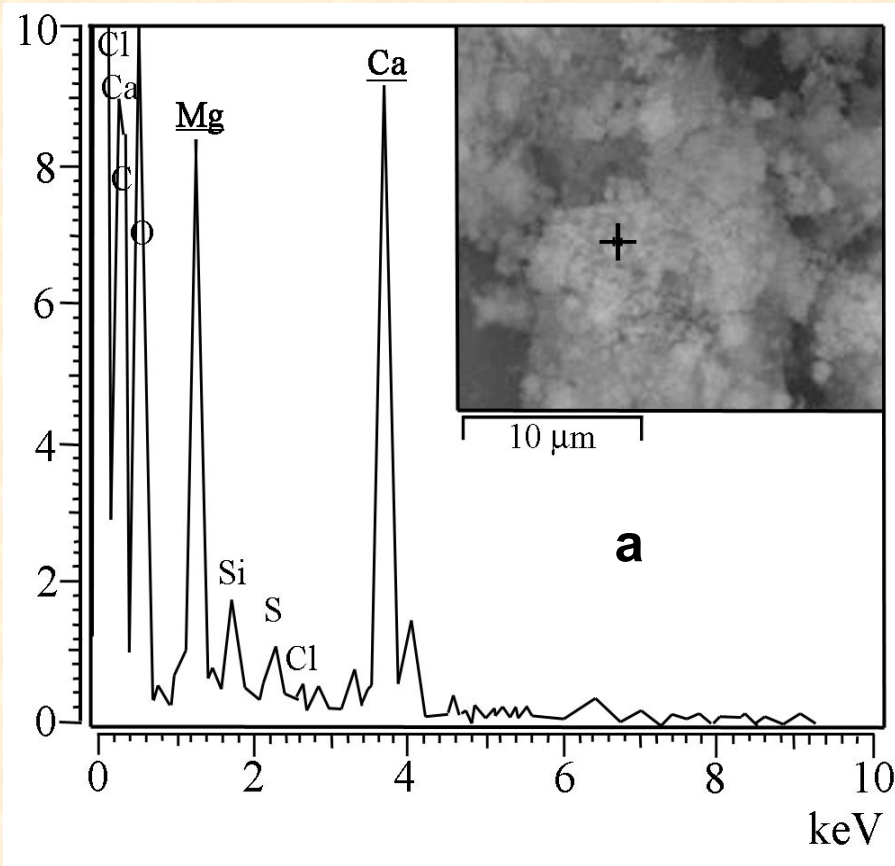
Electron Image 1



**SEM фото и энерго-дисперсионный спектр арагонита из осадков озера Верхнее Белое**

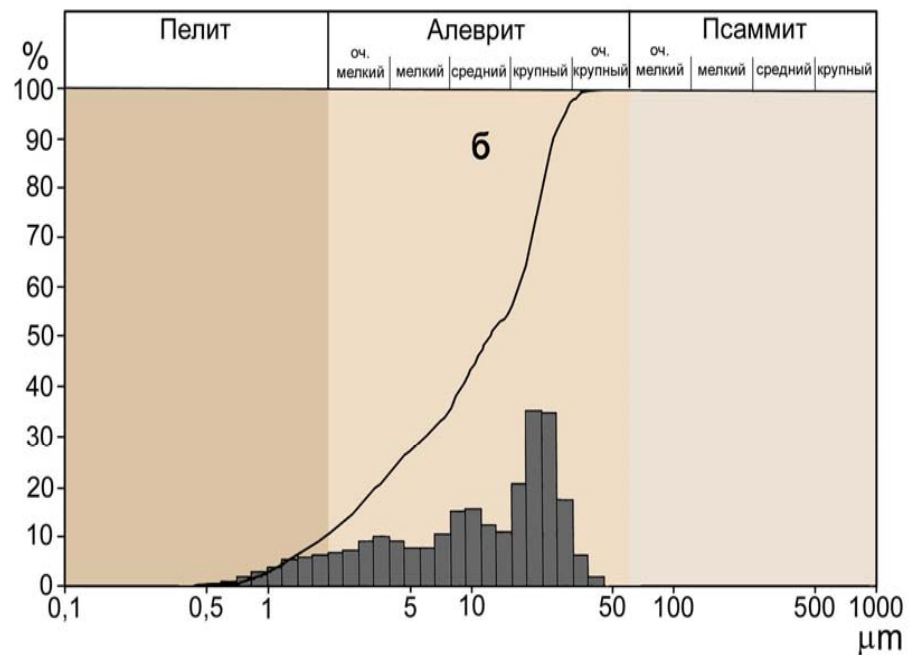
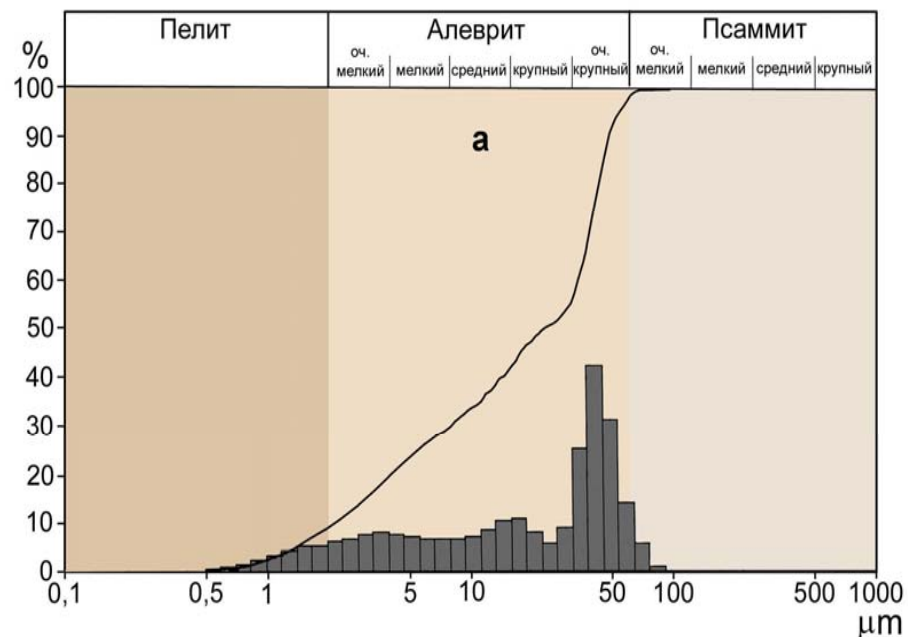


# Электронная микроскопия хомогенных карбонатов осадков оз. Верхнее Белое



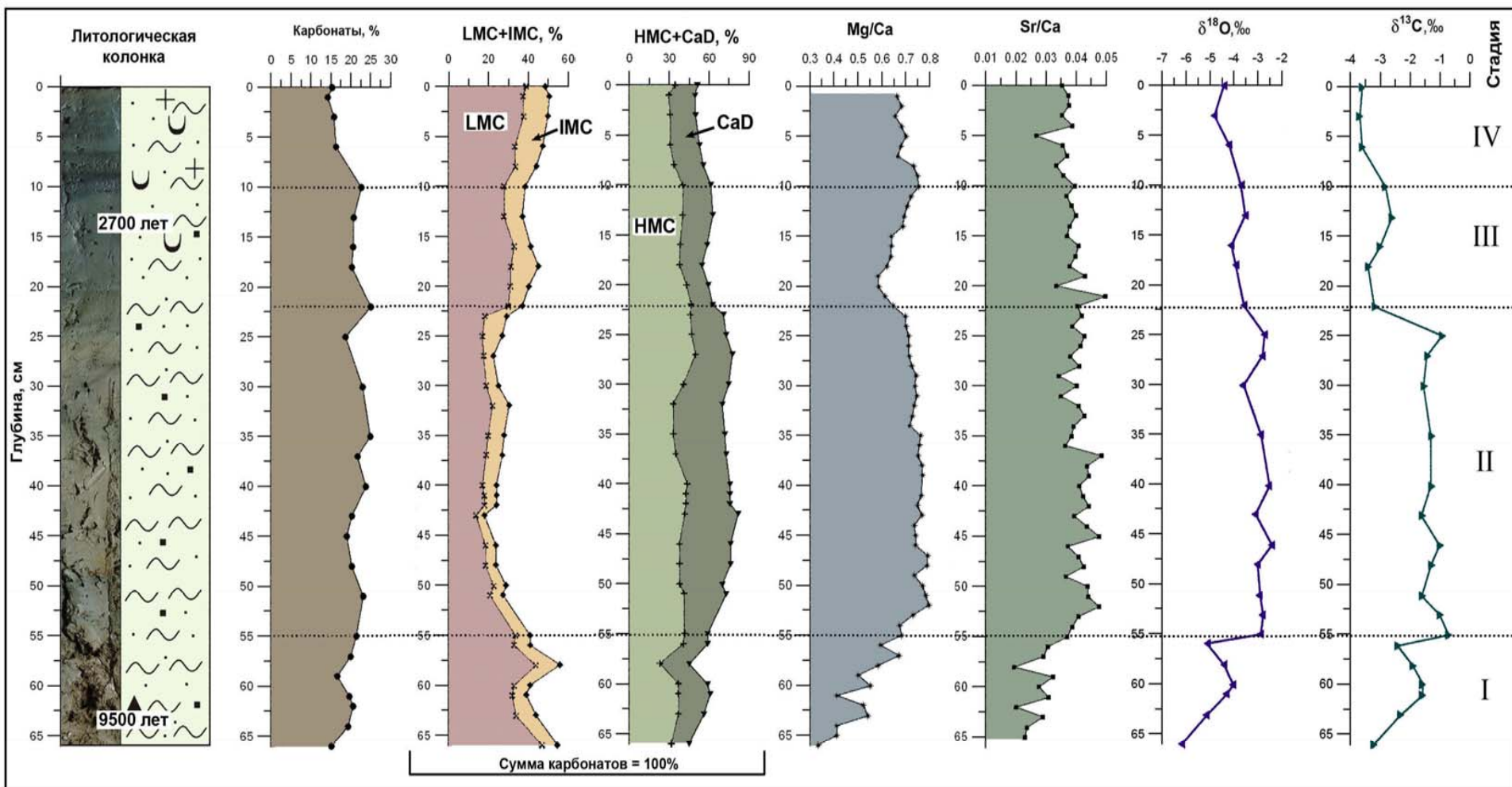
Энергодисперсионные спектры Mg-кальцитов: а – обр. 37-38 см (преобладают высоко-Mg кальцит + Ca-избыточный доломит (аридный климат); б – обр. 4-5 см (преобладает низко-Mg кальцит (гумидный климат). На врезках SEM фото.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ОБРАЗЦОВ ДОННЫХ ОСАДКОВ ОЗ. ВЕРХНЕЕ БЕЛОЕ

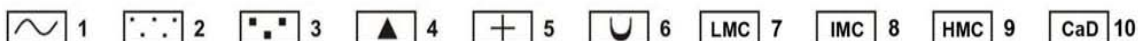


Результаты гранулометрического анализа образцов осадочного разреза оз. Верхнее Белое: а – стадия IV (обр. 4-5 см, верх разреза, теплый гумидный климат, период обводненности озерной котловины); б – стадия II (обр. 37-38 см, середина разреза, аридный климат, мелководное озеро). Карбонаты были предварительно растворены. Гистограмма является статистическим распределением частиц, линия – кумулятивной кривой гранулометрического состава. На горизонтальной оси указан диаметр частиц в логарифмическом масштабе.

# Распределение в осадочном разрезе оз. Верхнее Белое карбонатов, геохимических индикаторов палеоклиматических изменений (отношения Mg/Ca и Sr/Ca), стабильных изотопов ( $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$ )



Условные обозначения:



1- пелит, 2 - алеврит, 3 - песок, 4 - гравий, 5 - диатомеи, 6 - раковины моллюсков, 7 - низко-Mg кальцит, 8 - промежуточный Mg кальцит, 9 - высоко-Mg кальцит, 10 - Ca-избыточный доломит

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе детальных минералого-кристаллохимических исследований голоценовых осадков малого соленого бессточного оз. Верхнее Белое получена карбонатная запись высокого разрешения, содержащая сведения о стратиграфическом распределении Mg-кальцитов, представляющих собой ряд от низко- до высокомагнезиальных структурно разупорядоченных разностей, в том числе Ca-избыточный доломит, и распределении арагонита.
2. Сопоставление карбонатной записи из голоценового разреза озера с данными литологического анализа, лазерной гранулометрии, результатами определения стабильных изотопов ( $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$ ) и распределением ряда геохимических индикаторов климатических изменений позволило воссоздать историю эволюции водного бассейна оз. Верхнее Белое (от периодов обводнения до состояния плайевого озера), определяемую климатом региона (Джидинская котловина, Западное Забайкалье) от послеледникового периода до современности.

## ОПУБЛИКОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Солотчина Э.П., Кузьмин М.И., Столповская В.Н., Прокопенко А.А., Солотчин П.А. Минералогия карбонатов в осадках озера Хубсугул: водный баланс и палеоклиматические обстановки // ДАН. 2008. Т.419. №3. С.387-392.
2. Солотчина Э.П., Склярлов Е.В., Вологина Е.Г. и др. Карбонаты в осадочной летописи соленого озера Цаган-Тырм (Западное Прибайкалье): новый тип палеоклиматических сигналов высокого разрешения // ДАН. 2008. Т. 421. № 3. С. 391-398.
3. Solotchina E.P., Prokopenko A.A., Kuzmin M.I. et al. Climate signals in sediment mineralogy of Lake Baikal and Lake Novsgol during the LGM-Holocene transition and the 1-Ma carbonate record from the HDP-04 drill core // Quatern. Intern. 2009. V. 205. P. 38-5.
4. Солотчина Э.П. Структурный типоморфизм глинистых минералов осадочных разрезов и кор выветривания. Новосибирск, Академ. изд-во «Гео». 2009. 264 с.
5. Склярлов Е.В., Солотчина Э.П., Вологина Е.Г. и др. Детальная летопись климата голоцена из карбонатного разреза соленого озера Цаган-Тырм, Западное Прибайкалье // Геология и геофизика. 2010. V. 51. № 3. С. 303-328.
6. Склярлов Е.В., Солотчина Э.П., Вологина Е.Г. и др. Климатическая история голоцена Западного Прибайкалья в карбонатной осадочной летописи озера Холбо-Нур // ДАН. 2010. Т.431. № 5. С. 668-674 .
7. Prokopenko A.A., Bezrukova E.V., Khursevich G.K., Solotchina E.P., Kuzmin M.I., Tarasov P.E. Climate in continental interior Asia during the longest interglacial of the past 500,000 years: the new MIS 11 records from Lake Baikal, SE Siberia // Clim. Past. 2010. V.10. P.31-48.
8. Солотчина Э.П., Склярлов Е.В., Вологина Е.Г. и др. Климатические сигналы в карбонатной осадочной летописи голоцена озера Намши-Нур, Западное Прибайкалье // ДАН. 2011. Т. 436. № 6. С. 814-819.
9. Гаськова О.Л., Солотчина Э.П., Склярова О.А. Реконструкция эволюции состава растворов по данным осадочной летописи соленых озер Приольхонья // Геология и геофизика. 2011. Т.52. № 5. С. 704-711.

A photograph of a sunset over a body of water. The sun is low on the horizon, creating a bright orange and yellow glow that reflects on the water's surface. The foreground is filled with dark, silhouetted reeds and grasses. The background shows a dark line of trees against the bright sky. The overall mood is peaceful and calm.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе детальных минералого-кристаллохимических исследований голоценовых осадков малого соленого бессточного оз. Верхнее Белое получена карбонатная запись высокого разрешения, содержащая сведения о стратиграфическом распределении Mg-кальцитов, представляющих собой ряд от низко- до высокомагнезиальных структурно разупорядоченных разностей, в том числе Са-избыточный доломит, и распределении арагонита.
2. Сопоставление карбонатной записи из голоценового разреза озера с данными литологического анализа, лазерной гранулометрии, результатами определения стабильных изотопов ( $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$ ) и распределением ряда геохимических индикаторов климатических изменений позволило воссоздать историю эволюции водного бассейна оз. Верхнее Белое (от периодов обводнения до состояния плейстового озера), определяемую климатом региона (Джидинская котловина, Западное Забайкалье) от послеледникового периода до современности.