

УДК 549.02:551.31:551.583

МИНЕРАЛОГИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОПОРНОГО РАЗРЕЗА УЛАН-ЖАЛГА (ЗАПАДНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ): ОТКЛИК НА КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОБСТАНОВКИ ЧЕТВЕРТИЧНОГО ПЕРИОДА

© 2023 г. Э. П. Солотчина^{1,*}, М. А. Ербаева², А. А. Щетников^{3,4,5}, академик РАН М. И. Кузьмин⁴, П. А. Солотчин¹, А. Н. Жданова¹

Поступило 22.05.2023 г.

После доработки 22.06.2023 г.

Принято к публикации 28.06.2023 г.

В работе представлены результаты изучения вещественного состава четвертичных субаэральномаслоновых отложений нового опорного разреза Улан-Жалга (Западное Забайкалье) мощностью около 30 м. Методы исследования — рентгеновская дифрактометрия (XRD), ИК-спектроскопия, лазерная гранулометрия, элементный анализ. В минеральном составе изученных отложений установлены кварц, полевые шпаты, глинистые минералы, карбонаты, гематит, следы амфибола. Впервые для субаэрального разреза показано, что состав и структура карбонатных минералов являются индикатором климатических изменений в плейстоцене и голоцене. Для корректной идентификации и определения количественных соотношений карбонатов применялся метод моделирования их XRD-профилей функцией Пирсона VII. Установлено, что в строении разреза участвуют две различающиеся по литолого-минералогическим характеристикам мощные толщи субаэральных отложений, соответствующие двум крупным этапам осадконакопления. Нижняя толща образовалась в условиях умеренной ветровой деятельности и сравнительно высокой влагообеспеченности, о чем свидетельствуют широкое развитие почвенных горизонтов и присутствие низко-Mg-карбонатов. Верхняя толща, сформировавшаяся в более холодных и сухих условиях с повышенной динамикой эоловых процессов, характеризуется наличием кальцита, высоко-Mg кальцита и Са-избыточного доломита.

Ключевые слова: субаэральные отложения, XRD-анализ, карбонаты, кварц, полевые шпаты, четвертичный период, Западное Забайкалье

DOI: 10.31857/S2686739723601096, **EDN:** FOHYWC

Изменения окружающей среды, обусловленные глобальным потеплением климата, происходят в настоящее время в различных регионах планеты и приобретают необратимый характер, что ставит перед научным сообществом задачи, решение которых невозможно без климатического прогноза на ближайшее будущее. В этой связи

особое значение приобретают исследования природных объектов, представляющих собой палеоклиматические архивы недавнего по геологическим меркам прошлого Земли, поскольку именно обстановки четвертичного периода, особенно голоцена и позднего плейстоцена, в мировой практике рассматриваются как близкие аналоги современности и/или как потенциальные аналоги климата будущего. Изучение континентального седиментогенеза при проведении палеоклиматических реконструкций в настоящее время является чрезвычайно развитым направлением. Континентальное осадкообразование, существенно уступающее по масштабам морскому, тем не менее, отличается значительным разнообразием типов отложений. На ведущую роль климатического фактора в формировании континентальных субкальвальных отложений неоднократно указывал в своих работах Н.М. Страхов [1]. Не меньшее фундаментальное научное значение имеют климатические летописи высокого разрешения, полученные из субаэральных осадочных разрезов.

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

²Геологический институт им. Н.Л. Добрецова Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия

³Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

⁴Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

⁵Геологический институт Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: solot@igm.nsc.ru

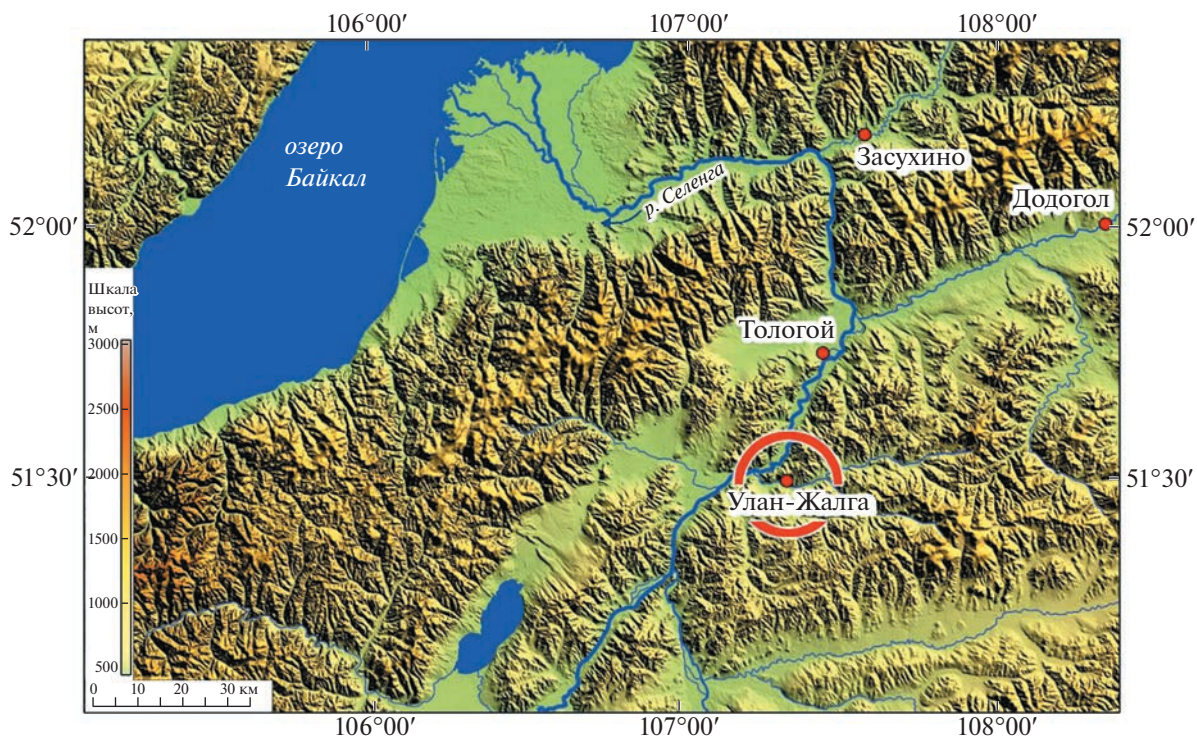


Рис. 1. Расположение опорного разреза квартера Улан-Жалга (обозначено красным кружком) на цифровой 3D-модели рельефа Западного Забайкалья.

Несомненная важность проблемы требует привлечения новых объектов и методов исследований.

Внутриконтинентальная Азия, значительную часть которой занимает Сибирский регион, оказывает заметное влияние на характер глобального климата. Этот обширный, местами глубоко расчлененный массив суши играет важную роль в распределении и перераспределении атмосферной циркуляции на территории всего северного полушария. При этом, если на территории Западной Сибири субаэральные разрезы четвертичных отложений в виде лёссово-почвенных последовательностей большой мощности изучены достаточно подробно, в том числе и с точки зрения изменений природной среды и климата, например, [2], то Восточная Сибирь во многом продолжает оставаться *terra incognita*. В Байкальском регионе разрезы четвертичных осадочных комплексов, которые могут быть расчленены с высоким хроностратиграфическим разрешением, немногочисленны. Среди них наиболее важным и полно охарактеризованным опорным разрезом континентальных субаэриальных отложений долгое время оставался разрез Тологой [3], открытый в 1952 г. А.П. Окладниковым. В 2017 г. в Западном Забайкалье был открыт новый разрез верхнего кайнозоя Улан-Жалга (рис. 1), результаты предварительных исследований которого были опублико-

ваны ранее в форме краткого сообщения [4]. В настоящее время выполнены комплексные исследования отложений разреза, включающие палеонтологические, палео- и петромагнитные, литологические и геохимические данные, позволившие выявить условия седиментогенеза и в целом проследить изменения природной среды и климата региона в течение плейстоцена и голоцена. Вместе с тем минералогический аспект традиционно остается “слабым местом” подобных работ, как правило, минералого-кристаллохимические исследования редки. Между тем ассоциации, состав, структурные характеристики отдельных минеральных фаз позволяют с высокой степенью детальности воссоздавливать региональную летопись климатических событий, что и определяет актуальность проведенных нами исследований. Цель настоящей работы — изучение вещественного состава субаэриальных отложений разреза Улан-Жалга, выявление типоморфного значения ассоциаций и кристаллохимических характеристик карбонатных минералов и решение на этой основе задач, связанных с реконструкциями климатических событий четвертичного периода в Байкальском регионе.

Разрез Улан-Жалга ($51^{\circ}29'40.75''$ с.ш., $107^{\circ}20'18.11''$ в.д.) расположен на северной окраине пос. Тарбагатай — в приустьевой части долины р. Куйтунка, правого притока р. Селенга. Обна-

жение приурочено к подошве южного выступа останцового массива Омудевский с относительной высотой 300 м. Поверхность педимента имеет довольно крутой наклон (до 25°), его верхняя часть сложена продуктами разрушения выветрелых гранитных денудационных останцов. Основание педимента сложено толщей эолово-делювиальных песков, лёссовидных супесей и суглинков, подстилаемых красноцветными облессованными глинами. Днище долины р. Куйтунка занято широкой аллювиальной равниной, где русло водотока меандрирует, перемещаясь от одного склона к другому и подрезая уступами основания педиментов. В одном из таких эрозионных уступов высотой около 30 м вскрываются отложения разреза Улан-Жалга (рис. 2).

Изучение вещественного состава отложений проводилось комплексом методов, включающим рентгеновскую дифрактометрию (XRD), ИК-спектроскопию, лазерную гранулометрию, рентгенофлуоресцентный анализ. Рентгеновские исследования выполнены на дифрактометре ARL X'TRA (излучение CuK_α). Для фазового анализа образцы были отсканированы в интервале от 2° до 65° (2 θ) с шагом 0.05°, время сканирования в точке 3 сек. Дифференциальная диагностика карбонатных минералов выполнена методом математического моделирования XRD-профилей высокого разрешения [5, 6]. Для моделирования XRD-профилей карбонатной составляющей осадка образцы были отсканированы в интервале от 29 до 32° (2 θ) с тем же шагом 0.05°, но увеличенным временем сканирования в точке (15 сек). ИК-спектры были записаны на спектрометре VERTEX 70 FT I. Образцы готовились методом прессования таблеток с KBr. Гранулометрический анализ терригенного компонента осадков проводился на лазерном микроанализаторе частиц Analysette 22 MicroTec. Содержание оксидов породообразующих элементов определялось на рентгенофлуоресцентном спектрометре S8 TIGER.

В разрезе выделено 35 слоев, которые объединяются по своим литологическим характеристикам и фаунистическим данным в 5 пачек. Палеомагнитные и палеонтологические данные позволили провести оценку времени формирования разреза Улан-Жалга. Нижняя пачка 1 (слои 1–8) представляет собой красноцветную лёссово-почвенную последовательность — переслаивание эоловых суглинков с тонкими линзами гравелисто-песчаных делювиальных накоплений и суглинками погребенных почв. Ископаемые остатки полевок родов *Borsodia* и *Allophaiomys* свидетельствуют о формировании отложений на ранних этапах раннего плейстоцена. Пачка 2 фиксирует стратиграфический перерыв с разрывом. Накопление пачки 3 (слои 10–27) началось ~ 1 млн лет назад, а граница между нижним и средним плейстоценом (граница Матуяма/Брюнес) проходит на глубине

15 м, что согласуется с последовательной сменой фаунистических комплексов. Пачка 4 (слои 28–30) представляет собой супеси с присутствием карбонатов, вмещающие плохо развитую погребенную почву, практически лишенную органического материала — эоловые образования с делювиальной проработкой. По видовому составу фауны мелких млекопитающих данная толща датируется средним плейстоценом. Пачка 5 (слои 31–35) сложена разнотекстурными песками и лёссовидными супесями и представляет собой эолово-делювиальные отложения, в которых встречаются немногочисленные костные остатки характерных представителей фауны позднего плейстоцена.

Если исключить из рассмотрения грубозернистые селевые отложения пачки 2, то по результатам гранулометрического анализа в разрезе Улан-Жалга отчетливо выделяются две мощные толщи, граница между которыми проходит на глубине ~12 м. Нижняя толща, включающая пачку 1 (ранний этап раннего плейстоцена) и пачку 3 (ранний/средний плейстоцен), представлена преимущественно алевритовыми и глинистыми фракциями (рис. 2, гл. 28.9 м). Отложения верхней толщи, объединяющие пачку 4 (средний плейстоцен) и пачку 5 (поздний плейстоцен и голоцен), сложены существенно опесчаненными осадками (рис. 2, гл. 2.0 м). Нижняя часть разреза характеризуется красноватыми и бурыми оттенками осадков, а верхняя — это преимущественно серые или светло-коричневые отложения. Кроме того, в нижней алевритовой толще фиксируется 16 погребенных почвенных горизонтов, тогда как в опесчаненной верхней части отмечается только три таких горизонта.

Для изучения вещественного состава отложений был опробован каждый из выделенных в разрезе слоев, всего проанализировано 37 образцов. Методом рентгеновского дифракционного анализа (XRD) в отложениях установлены кварц, полевые шпаты (плагиоклаз и калиевый полевой шпат), глинистые минералы (слюда и хлорит), карбонаты, гематит, следы амфибола (рис. 3). Для верхней толщи характерно преобладание кварцевой составляющей (рис. 3, гл. 2.0 м). С глубины 12 м вниз по разрезу доля кварца начинает заметно уменьшаться, при этом содержание полевых шпатов (плагиоклаза и ортоклаза) возрастает (рис. 3, гл. 28.9 м). Глинистые минералы на протяжении всего разреза сложены слюдой (биотитом) и 14 Å-хлоритом. Данные XRD находятся в полном согласии с результатами ИК-спектроскопии и рентгенофлуоресцентного анализа.

Информативными в плане реконструкций природных обстановок являются слои с повышенным содержанием карбонатов. Карбонатные минералы, доля которых может составлять до 15–

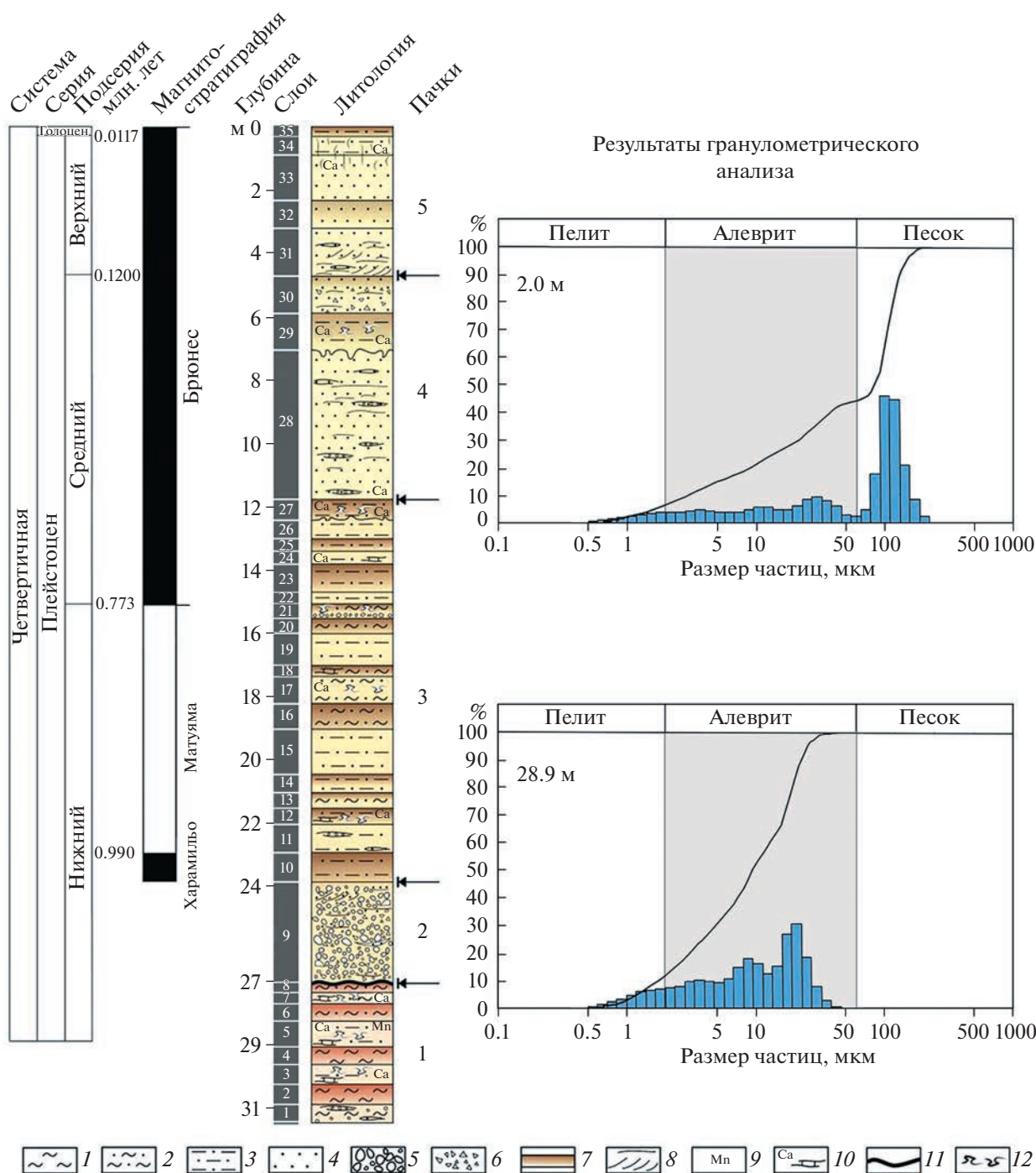


Рис. 2. Литолого-стратиграфическое строение разреза Улан-Жалга и результаты гранулометрического анализа образцов из верхней (глуб. 2.0 м) и нижней (глуб. 28.9 м) толщ. Условные обозначения: 1 – глины, 2 – суглинки, 3 – супеси, 4 – пески, 5 – гравий, 6 – дресва, 7 – почвы, 8 – характер слоистости, 9 – повышенное содержание марганца, 10 – повышенное содержание карбонатов, 11 – поверхность размыва, 12 – криогенные нарушения.

17% от минерального состава образца, сложены безводными тригональными разновидностями: Mg-кальцитами разной степени магнезиальности, кальцитом CaCO_3 , и Ca-избыточными доломитами $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$ в переменных соотношении.

Диагностика карбонатов кальцит-доломитового ряда методом XRD-анализа проводилась нами по наиболее интенсивным у тригональных карбонатов отражениям $hkl = 104$ в области углов $29\text{--}31^\circ 2\theta \text{ CuK}\alpha$ (рис. 4). Значения межплоскост-

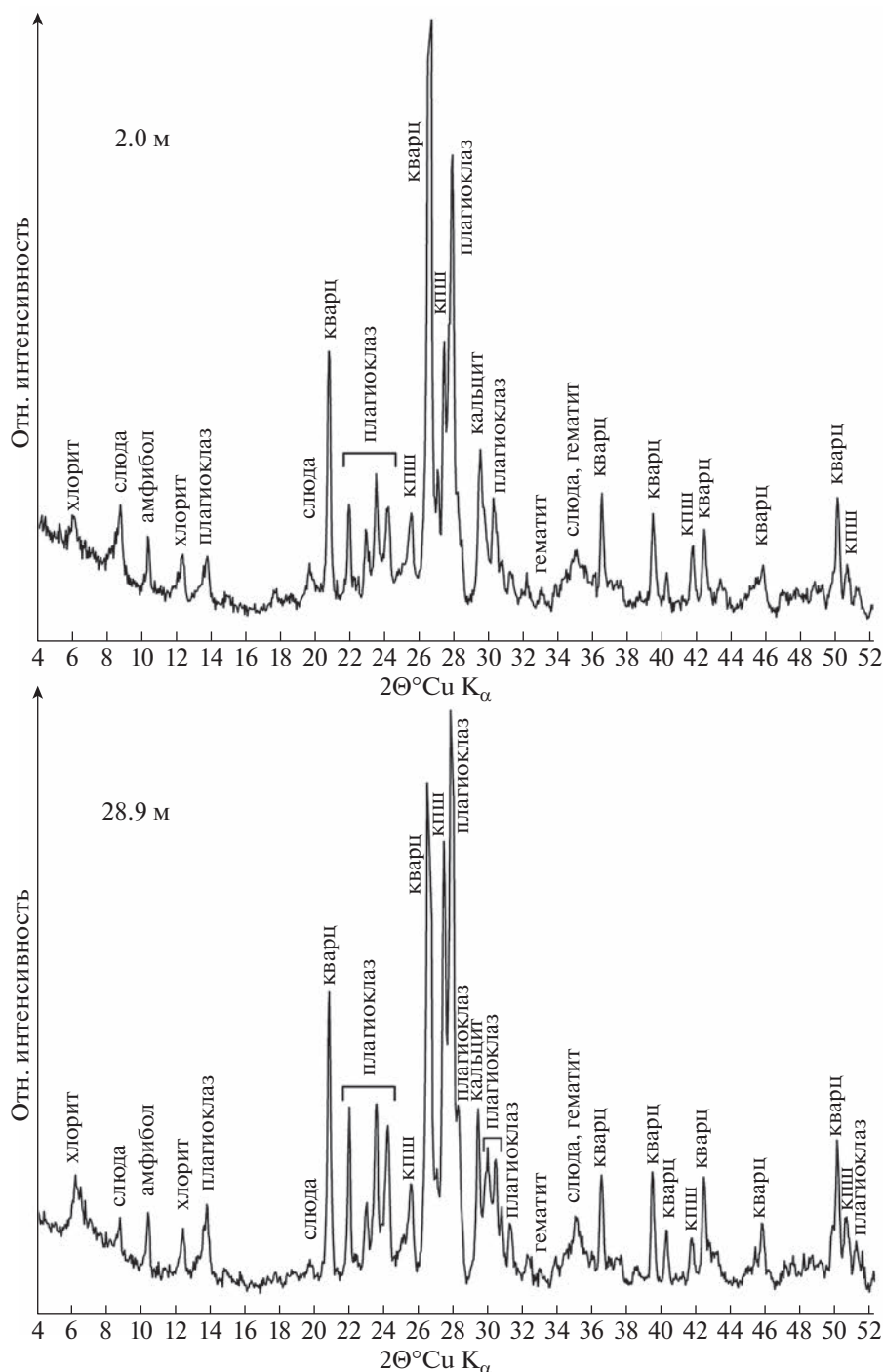


Рис. 3. Типичные дифрактограммы образцов отложений из верхней (глуб. 2.0 м, слой 33) и нижней (глуб. 28.9 м, слой 4) толщ разреза субаэрально-склоновых отложений Улан-Жалга (Западное Забайкалье).

ных расстояний d_{104} располагаются в интервале от 3.036 Å (кальцит) до 2.887 Å (стехиометрический доломит) и служат мерой магнезиальности [7].

По величине d_{104} мы делим карбонаты ряда кальцит-доломит на три группы: 1) низкомагнезиальные кальциты с содержанием MgCO_3 в

структуре <4–5 мол. % ($3.036 \text{ Å} > d_{104} > 3.02 \text{ Å}$); 2) промежуточные магнезиальные кальциты с 5–18 мол. % MgCO_3 в структуре ($3.02 \text{ Å} > d_{104} > 2.98 \text{ Å}$); 3) высокомагнезиальные кальциты с содержанием 18–43 мол. % MgCO_3 ($2.98 \text{ Å} > d_{104} > 2.91 \text{ Å}$). Са-избыточные доломиты, в структуре которых избыток CaCO_3 может достигать 7 мол. % относи-

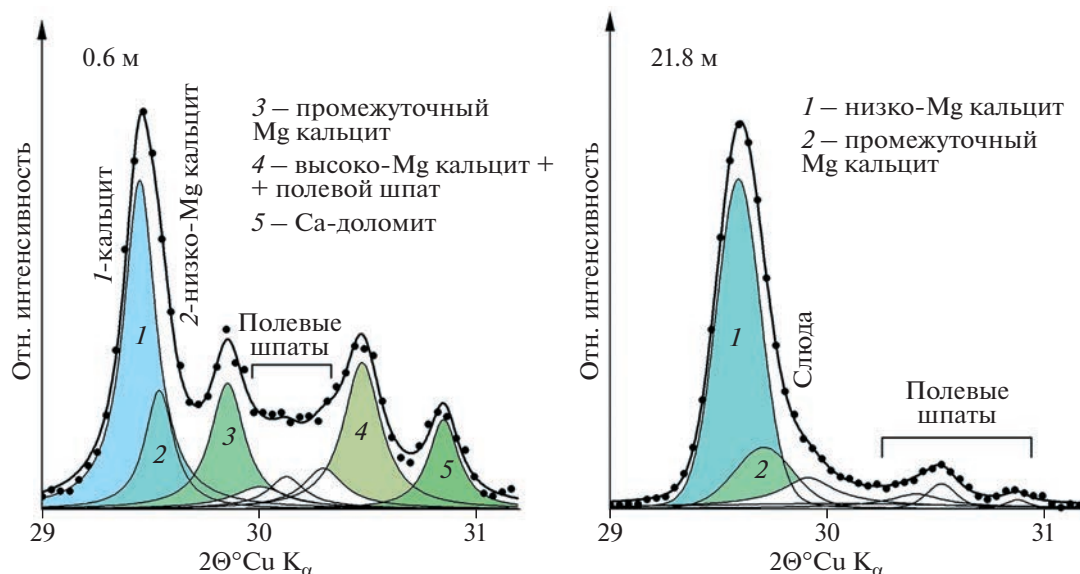


Рис. 4. Результаты моделирования экспериментальных XRD-профилей карбонатов из отложений верхней толщи – глубина 0.6 м, и нижней толщи – глубина 21.8 м разреза Улан-Жалга. Точки – экспериментальные дифрактограммы типичных образцов; сплошные линии – интегрированные модели. Цветные пики – вклады отдельных карбонатных фаз в общую дифракционную картину. Отчетливо видно хорошее совпадение интегрированных моделей (сплошная линия) и экспериментальных дифрактограмм (точки). Примечания. Сумма карбонатных минералов в образце принята за 100%. При съемке XRD-профилей в качестве внутреннего стандарта использовался Si металлический ($d_{100} = 3.135 \text{ \AA}$). Условная граница между (низкомагнезиальными + промежуточными кальцитами) и высокомагнезиальными располагается на $30^\circ 2\theta \text{ CuK}\alpha$ ($d_{104} = 2.98 \text{ \AA}$).

тельно доломита *sensu stricto*, характеризуются значениями d_{104} от 2.91 до 2.887 $\text{\AA}$. Для выявления всего набора присутствующих в образцах карбонатных минералов нами использовалось разложение их сложных XRD-профилей на индивидуальные пики функцией Пирсона VII. Определение содержания MgCO_3 в карбонатных фазах образцов, записанных на дифрактограммах с высоким разрешением, проводилось по калибровочным графикам зависимости величины d_{104} от содержания мол. % MgCO_3 [8, 9]. Параметры модельных XRD-спектров приведены в табл. 1. Ранее нами было установлено [6] для субаквальных континентальных разрезов, что, в общем случае, сравнительно теплый и влажный климат ведет к образованию в осадках низкомагнезиальных разновидностей кальцитов, а аридизация сопровождается формированием высокомагнезиальных фаз минерала, вплоть до Са-доломитов. Минерало-кристаллохимическое изучение отложений разреза Улан-Жалга показало, что в нижней части разреза преобладают низкомагнезиальные и промежуточные кальциты, в то время как в верхней части, кроме того, присутствуют стехиометрические кальциты, высокомагнезиальные кальциты и Са-избыточные доломиты (рис. 4, табл. 1).

Согласно результатам проведенных исследований, формирование разреза Улан-Жалга отвечает двум крупным этапам осадконакопления,

граница между которыми проходит на глубине около 12 м и четко фиксируется по минералогическим, литологическим, палеонтологическим и другим данным. Впервые на примере разреза субаэральных (эолово-делювиальных) отложений показано, что изменения в составе и структуре аутигенных карбонатных минералов являются следствием климатических изменений в плейстоцене и голоцене.

Нижняя толща образовалась в условиях умеренной интенсивности ветровой деятельности и сравнительно высокой влагообеспеченности, о чем свидетельствуют широкое развитие почвенных горизонтов и присутствие низко-Mg карбонатов. Верхняя толща сформировалась в более холодных и сухих условиях с повышенной динамикой эоловых процессов и характеризуется наличием кальцита, высоко-Mg кальцита и Са-избыточного доломита. В палеоландшафтах этого периода доминирующими становятся сухие степи, полупустынные и пустынные участки. Погребенные почвы верхней части разреза значительно менее развиты и нарушены криогенными процессами. Следует отметить, что двучленное строение четвертичных субаэральных отложений Западного Забайкалья отмечается и в упомянутом выше разрезе Тологой. В работе [10], на основании литологических, петро- и палеомагнитных данных разрез Тологой подразделяется на 2 толщи, граница между которыми проходит на глуби-

Таблица 1. Параметры модельных XRD-профилей карбонатов образцов верхней и нижней толщ разреза Улан-Жалга, представленных на рис. 4

Глубина	Карбонаты	№ линии	$2\theta^\circ \text{CuK}\alpha$	$d, \text{\AA}$	Содержание	
					фазы, %	MgCO_3 , мол. %
Верхняя толща, 0.6 м	Кальцит	1	29.451	3.036	40	0
	Низко-Mg кальцит	2	29.541	3.025	13	4.5
	Промежуточный Mg кальцит	3	29.855	2.994	16	14
	Высоко-Mg кальцит	4	30.476	2.935	21	33
	Са-избыточный доломит	5	30.851	2.900	10	44
Нижняя толща, 21.8 м	Низко-Mg кальцит	1	29.592	3.020	76	4.0
	Промежуточный Mg кальцит	2	29.768	3.003	24	10

не 9 м, при этом нижняя толща сформировалась в относительно теплых и влажных обстановках, а верхняя — в более суровых, засушливых природных условиях.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400243-9), ГИН СО РАН (№ FWSG-2021-0003) и ИГХ СО РАН (№ 0284-2021-0003) при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, а также РНФ (№ 19-17-00216, литолого-стратиграфические, геоморфологические, петро- и палеомагнитные исследования). Основные аналитические работы проведены в ЦКП “Многоэлементных и изотопных исследований” ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) и ЦКП “Геодинамика и геохронология” ИЗК СО РАН (г. Иркутск), грант № 075-15-2021-682.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Страхов Н.М., Бродская Н.Г., Князева Л.М., Разживина А.Н., Ратеев М.А., Сапожников Д.Г., Шишова Е.С. Образование осадков в современных водоемах. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 791 с.
2. Зыкина В.С., Зыкин В.С. Лессово-почвенная последовательность и эволюция природной среды и климата Западной Сибири в плейстоцене. Новосибирск: Изд-во “Гео”, 2012. 477 с.
3. Иванова В.В., Ербаева М.А., Щетников А.А., Казанский А.Ю., Матасова Г.Г., Алексеева Н.В., Филинов И.А., Кузьмин М.И. Опорный разрез Тологой (верхний кайнозой, Забайкалье): реконструкция условий и особенностей осадконакопления // Геология и геофизика. 2020. Т. 61. Вып. 12. С. 1672–1691.
4. Ербаева М.А., Щетников А.А., Казанский А.Ю., Матасова Г.Г., Хензыхенова Ф.И., Филинов И.А., Намзалова О.Д.-Ц., Нечаев И.О. Новый опорный разрез плейстоцена Улан-Жалга в Западном Забайкалье // ДАН. 2019. Т. 488. № 3. С. 48–52.
5. Solotchina E.P., Prokopenko A.A., Kuzmin M.I., Solotchin P.A., Zhdanova A.N. Climate signals in sediment mineralogy of Lake Baikal and Lake Hovsgol during the LGM-Holocene transition and the 1-Ma carbonate record from the HDP-04 drill core // Quatern. Intern. 2009. V. 205. P. 38–52.
6. Солотчина Э.П., Солотчин П.А. Состав и структура низкотемпературных природных карбонатов кальцит-доломитового ряда // Журнал структурной химии. 2014. Т. 55. № 4. С. 814–820.
7. Veizer J. Trace elements and isotopes in sedimentary carbonates / Ed. R.J. Reeder. Carbonates: mineralogy and chemistry // Rev. Miner. Geochem. Miner. Soc. America. Washington. 1983. V. 11. P. 265–299.
8. Goldsmith J.R., Graf D.L. Relation between lattice constants and composition of the Ca-Mg carbonates // Amer. Miner. 1958. V. 43. P. 84–101.
9. Deelman J.C. Low-temperature formation of dolomite and magnesite. Open-access e-book, 2011. 512 p. <http://www.jcdeelman.demon.nl/dolomite/bookprospectus.html>.
10. Матасова Г.Г., Казанский А.Ю., Щетников А.А., Ербаева М.А., Филинов И.А. Новые петро- и палеомагнитные данные по четвертичным отложениям опорного разреза Тологой (Западное Забайкалье) и их палеоклиматическое значение // Физика Земли. 2020. № 3. С. 112–133.

MINERALOGY OF CONTINENTAL SEDIMENTS FROM THE ULAN-ZHALGA KEY SECTION (WESTERN TRANSBAIKALIA): RESPONSE TO QUATERNARY CLIMATIC CONDITIONS

E. P. Solotchina^{a, #}, M. A. Erbajeva^b, A. A. Shchetnikov^{c, d, e}, Academician of the RAS M. I. Kuzmin^d, P. A. Solotchin^a, and A. N. Zhdanova^a

^a*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

^b*N.L. Dobretsov Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation*

^c*Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

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

^e*Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: solot@igm.nsc.ru*

We present the results of studying the material composition of Quaternary subaerial-slope sediments of the new key section Ulan-Zhalga (Western Transbaikalia) with a thickness of about 30 m. The research methods include X-ray diffractometry (XRD), infrared spectroscopy, laser grain size analysis, elemental analysis. Quartz, feldspar, clay minerals, carbonates, hematite and traces of amphibole were found in the mineral composition of the studied sediments. For the first time the composition and structure of carbonate minerals were shown as a reliable indicator of climatic changes in the Pleistocene and Holocene for the subaerial section. For correct identification and determination of quantitative ratios of carbonates the mathematical modeling of their XRD patterns by the Pearson VII function was used. It has been established that the structure of the section involves two thick sequences differing in lithological and mineralogical features corresponding to two major stages of sedimentation. The lower sequence was formed under conditions of moderate wind activity and relatively high humidity as evidenced by the widespread development of soil horizons and the presence of low-Mg carbonates. The upper sequence, formed under colder and drier conditions with increased dynamics of aeolian processes is characterized by the presence of calcite, high-Mg calcite and excess-Ca dolomite.

Keywords: subaerial sediments, XRD analysis, carbonates, quartz, feldspars, Quaternary period, Western Transbaikalia