

УДК 551.312: 551.583: 551.21

ПОЗДНЕЧЕТВЕРТИЧНОЕ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЕ В ВЫСОКОГОРНОМ ОЗЕРЕ ХИКУШКА (ВОСТОЧНЫЙ САЯН): РОЛЬ КЛИМАТИЧЕСКОГО И ВУЛКАНИЧЕСКОГО ФАКТОРОВ

© 2021 г. П. А. Солотчин^{1,*}, академик РАН М. И. Кузьмин², Э. П. Солотчина¹, Е. В. Безрукова²,
В. Д. Страховенко^{1,3}, А. А. Щетников^{2,4,5,6}, А. Н. Жданова¹

Поступило 28.06.2021 г.

После доработки 12.07.2021 г.

Принято к публикации 23.07.2021 г.

Представлены результаты комплексного исследования позднеплейстоцен-голоценовых донных отложений высокогорного озера Хикушка, расположенного на территории Жом-Болокского вулканического района (Восточный Саян). Озеро является пресноводным, бессточным и имеет гляциальное происхождение; возраст осадков около 13 800 лет. Методы исследований: рентгеновская дифрактометрия (XRD), ИК-спектроскопия, лазерная гранулометрия, сканирующая электронная микроскопия, рентгенофлуоресцентный анализ, AMS-датирование. Впервые выполнены детальные минералогические исследования отложений оз. Хикушка. Показано, что в них преобладают полевые шпаты, кварц, слоистые силикаты, амфибол. Математическим моделированием сложных XRD-профилей среди слоистых силикатов установлены хлорит, иллит, иллит-смектит, хлорит-смектит, мусковит, вермикулит и каолинит; количественные соотношения этих минералов существенно меняются от плейстоцена к голоцену. Несмотря на близкое расположение вулканических конусов и многостадийность позднечетвертичных извержений в Жом-Болокском районе, в осадках озера обнаружены лишь косвенные признаки присутствия пирокластического материала. На основании проведенных минералого-кристаллохимических, литологических, геохимических исследований выделен ряд стадий эволюции бассейна оз. Хикушка, осадконакопление в котором происходило под влиянием как климатических (деятельность ледников, колебания уровня озера, его биопродуктивность), так и геологических (состав пород водосбора, позднечетвертичный вулканизм) факторов.

Ключевые слова: озерные отложения, глинистые минералы, моделирование XRD-профилей, поздний плейстоцен, голоцен, палеоклимат, вулканизм, Восточный Саян

DOI: 10.31857/S2686739721110153

Долговременные записи изменений природной среды и климата Земли хранятся в океанических осадках, где происходит медленное непрерывное осадконакопление в течение миллионов

лет. Тем не менее для проведения детальных реконструкций окружающей среды и палеоклимата отдельных регионов необходимо изучать осадконакопление не только в океанах, но и на континентах. Изучение континентального седиментогенеза, представляющего собой совокупность многофакторных процессов, протекающих в различных природных обстановках, является чрезвычайно развитым направлением в мировой практике. Осадкообразование во внутренних водоемах материков обладает рядом характерных черт, в частности, богатством новообразованных минеральных фаз, формирующихся за короткое время в небольшом по площади и глубине бассейне. Несмотря на возросшее число публикаций, так или иначе затрагивающих вопросы озерной седиментации, минералогический аспект традиционно остается “слабым местом” этих работ, в которых в основном рассматриваются геохимические особенности осадков, биостратиграфия,

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

² Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

³ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

⁴ Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

⁵ Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

⁶ Геологический институт Российской академии наук, Москва, Россия

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

экологическое состояние бассейнов. Между тем ассоциации, состав, структура, типоморфные особенности отложившихся минералов позволяют восстанавливать ландшафтно-климатические и тектонические условия, при которых осуществлялись процессы седиментации в водоемах стока. Перспективными объектами для изучения озера аутигенеза и его связи с природно-климатическими обстановками являются голоцен-плейстоценовые отложения современных малых озер. Во-первых, малые озера менее инертны в сравнении с крупными водоемами и отчетливо реагируют на короткопериодические флуктуации окружающей среды, во-вторых, эти отложения слабо затронуты постседиментационными изменениями и относительно доступны для непосредственного изучения. На территории обширного Сибирского региона озера встречаются повсеместно и в большом количестве, вместе с тем, разные районы Сибири отличаются по степени изученности осадков, как отдельных озер, так и их систем. Несмотря на трудную доступность горного массива Восточного Саяна, в последние годы удалось получить литологические, биостратиграфические, геохимические данные из голоцен-позднеплейстоценовых разрезов донных осадков нескольких высокогорных озер Жом-Болокского вулканического района (оз. Хара-Нур, оз. Каскадное-1) и его ближайшего окружения (оз. ESM-1) [1–3]. Вместе с тем в этих работах минералогическая кристаллохимическая исследования донных отложений отсутствуют.

Позднеплейстоценовое оледенение и последовавшие за ним вулканические события способствовали широкому развитию в Жом-Болокском районе процессов лимнического морфолитогенеза. Извержения сопровождалось формированием различных по генезису, глубине и минерализации озер. Днища троговых долин р. Жом-Болок и ее притока р. Хи-Гол заполнены потоками трахибазальтовых лав, а вулканические шлаковые конусы в самых верховьях долины фиксируют эпицентральную область прошлых излияний. К настоящему времени выделяется как минимум 4 этапа активизации вулканизма, самый ранний из которых начался на рубеже плейстоцена и голоцена, а последний завершился около 1000 л.н. [2–6].

Цель настоящей работы – изучение вещественного состава, ассоциаций и кристаллохимических характеристик глинистых минералов донных осадков высокогорного озера Хикушка для реконструкций условий осадконакопления в позднем плейстоцене-голоцене.

Озеро Хикушка (абс. выс. 1956 м) расположено в верховьях пади Хи-Гол (Долина вулканов), являющейся частью Жом-Болокского базальтового лавового поля, и имеет гляциальное происхождение [7]. Котловина озера обрамлена крутыми ска-

листыми склонами, от пади Хи-Гол ее отделяет узкий ригель, возвышающийся на несколько метров над уровнем воды в озере и над поверхностью лавового потока, фронт которого приблизился почти вплотную (300–400 м) к водоему. Комплекс пород горного обрамления озера относится к пестрой по составу окинской серии [8], которую слагают терригенные (от алевролитов до конгломератов), глаукофан-зеленосланцевые метаморфические и магматические (гранитоиды, габброиды и др.) образования. Озеро каровое, пресноводное, площадь водной поверхности составляет 0.3 км², глубина более 40 м, с октября по июнь оно покрыто льдом. Бурение проведено в летнее время керноотборным устройством ударно-канатного типа UWITEC (Австрия), диаметр ПВХ лайнеров составляет 67 мм. Было отобрано 3 керна озерных осадков на небольшом расстоянии друг от друга для различных видов анализа. КERN донных отложений длиной 124 см отобран с глубины 32 м в центре озера (52°41'39.0" с.ш.; 98°58'03.8" в.д.). Литолого-минералогические исследования донных отложений оз. Хикушка проводились комплексом методов, включающим рентгеновскую дифрактометрию (XRD), ИК-спектроскопию, лазерную гранулометрию, рентгенофлуоресцентный анализ, сканирующую электронную микроскопию (СЭМ), выполненных в “ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН” Института геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск. Интервал опробования составил 3 см. Рентгеновские исследования (XRD-анализ) проводились на дифрактометре ARL X'TRA (излучение CuK_α). Для фазового анализа образцы были отсканированы в интервале от 2° до 65° (2θ) с шагом 0.05°, время сканирования в точке 3 с. Качественно новый уровень исследований присутствующих в многокомпонентных системах слоистых силикатов обеспечен применением эффективного метода математического моделирования сложных рентгеновских дифракционных профилей [9, 10]. Анализировались исходные нефракционные пробы. Съёмка насыщенных этиленгликолем образцов проводилась в интервале от 2° до 35°, с тем же шагом 0.05°, но временем сканирования в точке 15 с. Линии присутствующих в образце неслоистых минералов описывались функцией Пирсона VII. ИК-спектры были записаны на спектрометре VERTEX 70 FT I. Образцы готовились методом прессования таблеток с КВг. Гранулометрический анализ проводился на лазерном гранулометре ANALYSETTE 22. Химический состав образцов определялся на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL-9900-XP. Изучение микроморфологии и состава минералов проводилось в сканирующем электронном микроскопе “TESCAN” MIRA 3 LMU. Датирование осадков выполнено методом AMS¹⁴C по общему органическому ве-

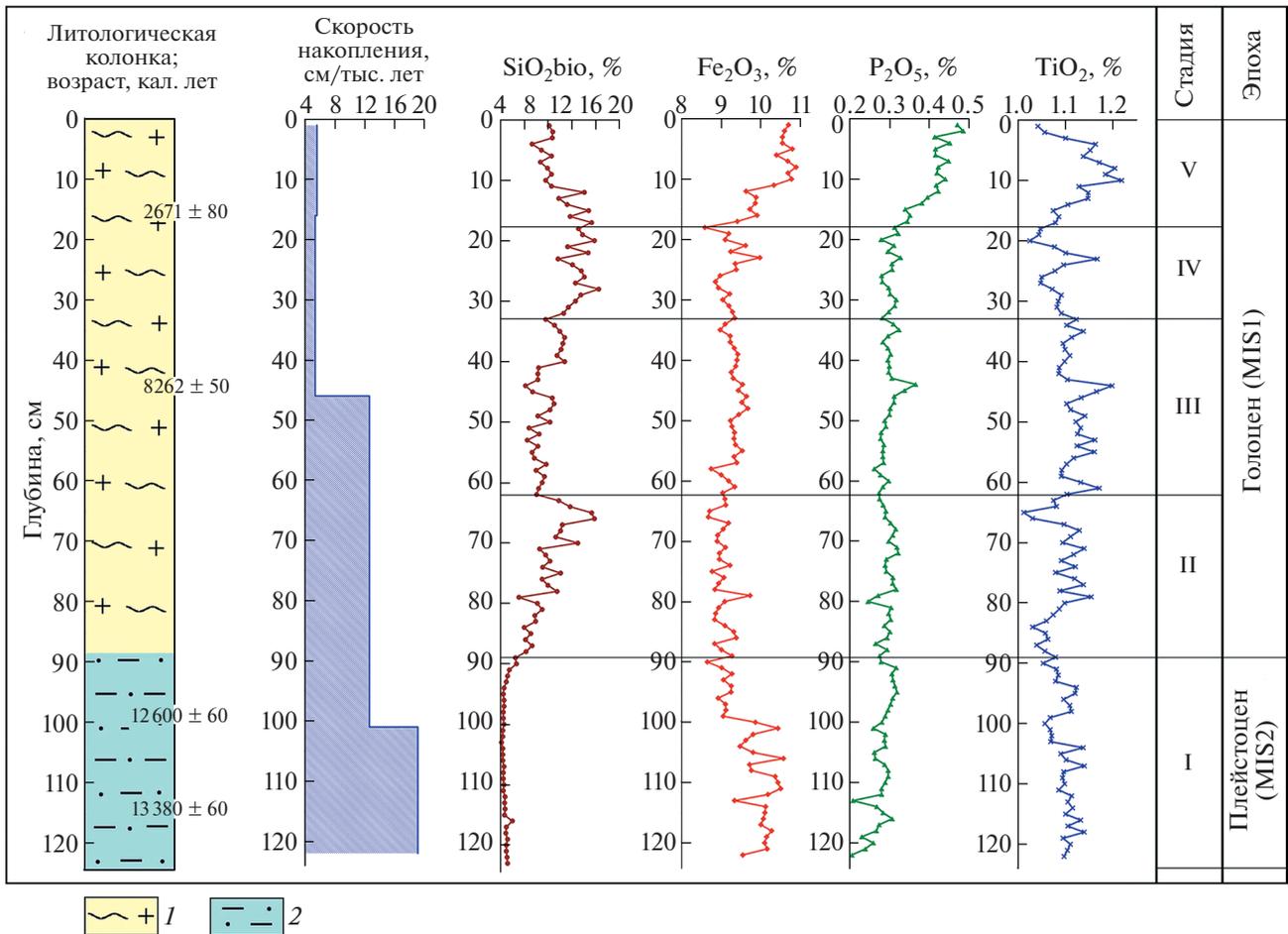


Рис. 1. Литологическая колонка донных отложений озера, возрастная модель, средние скорости осадконакопления на отдельных интервалах, распределения ряда элементов (SiO_2bio , Fe_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5), климатические стадии. 1 – биогенно-терригенный ил; 2 – однородные алеврито-глинистые осадки.

шеству в лаборатории радиоуглеродного анализа в г. Познань (Польша). Измеренные значения приведены в соответствии с калиброванной возрастом с использованием кривой INTCAL 13 [11]. Возрастная модель базируется на линейной интерполяции между соседними датами.

Разрез донных отложений оз. Хикушка имеет двучленное строение (рис. 1). В интервале 88–124 см залегают однородные светло-оливкового цвета алеврито-глинистые осадки с соотношением фракций: мелкий алеврит – 45–50% и пелит – 50–55%. Выше по разрезу (0–88 см) залегает толща глинистых алевритов, насыщенных диатомеями (биогенно-терригенные илы), цвет осадков – от светло-серого до серого, текстура массивная. Содержание пелитового материала составляет 30–40%, алевритовой фракции – 60–70%, причем количество грубого алеврита (фр. 0.05–0.1 мм) может достигать 30%, отмечается примесь (1–2%) мелкозернистого песка. Возраст изученных отло-

жений лежит в диапазоне от ~13 800 л.н. до современности (рис. 1). Всего было получено 4 даты на следующих глубинах: 114 см – 13 380 ± 60 кал. лет; 99 см – 12 600 ± 60 кал. лет; 45 см – 8265 ± 50 кал. лет; 15 см – 2671 ± 80 кал. лет. Исходя из возрастной модели, граница между алевритистыми глинами и биогенно-терригенными илами на уровне 88 см соответствует переходу от плейстоцена к голоцену. Рассчитанные скорости осадконакопления за время существования озера указывают на снижение темпов седиментации от подошвы к кровле разреза (рис. 1).

На начальном этапе образования озера (поздний плейстоцен) скорости седиментации были достаточно высоки (в среднем 19–20 см/тыс. лет), поскольку источниками вещества служили не только склоны озерной котловины, но и тающий ледник. В голоцене, в связи с исчезновением ледника и отсутствием постоянного притока в виде рек и ручьев, скорость осадконакопления в озере падает (в интервале глубин 100–45 см средняя ско-

рость седиментации составляет около 12.6 см/тыс. лет, в интервале 45–15 см – 5.3 см/тыс. лет, в интервале 15–0 см – 5.6 см/тыс. лет). Основными источниками поступления осадочного материала в бассейн являются временные потоки и гравитационное перемещение продуктов разрушения коренных пород. Преобладающим типом водного питания озера становится атмосферное. Водоем уменьшился, крупность осадков в точке бурения возросла, вероятно, из-за приближения к ней береговой линии.

По результатам XRD-анализа на протяжении всего разреза в осадках оз. Хикушка присутствуют полевые шпаты, кварц, слоистые силикаты и амфибол (рис. 2а). Состав пород базальтов Жом-Болокского вулканического поля и близкорасположенных конусов вулканов Кропоткина и Перетолчина идентичен: в них присутствуют плагиоклаз, клинопироксен (авгит), оливин, отмечаются следы слюды и гематита (рис. 2б). Результаты XRD-анализа полностью подтверждаются данными ИК-спектроскопии. Одними из основных компонентов осадков оз. Хикушка являются слоистые силикаты (рис. 2а), представленные преимущественно глинистыми минералами. Состав и кристаллическая структура этих “минералов-приспособленцев” (по образному выражению А.Г. Коссовской и О.В. Япаскурта) чутко реагируют на малейшие изменения физико-химических параметров среды и поэтому могут служить универсальным источником информации об областях питания, физико-химических обстановках выветривания, переноса вещества, седиментации и различных катастрофических процессах [12–15]. Прецизионный минералого-кристаллохимический анализ слоистых силикатов позволяет восстанавливать и определять ландшафтно-климатические и палеотектонические условия, в которых процессы седиментации осуществлялись. Методом математического моделирования XRD-профилей слоистых силикатов были выявлены их ассоциации, количественные соотношения и структурные характеристики. Установлено, что ассоциация слоистых силикатов в осадках оз. Хикушка неизменна на всем протяжении разреза и представлена хлоритом, иллитом, иллит-сметтитом, хлорит-сметтитом, мусковитом, вермикулитом и каолинитом, однако соотношения минералов существенно меняются от плейстоцена к голоцену (рис. 3).

В плейстоценовых осадках (обр. 121–122 см) среди слоистых силикатов преобладают иллит и смешанослойный иллит-сметтит, на долю которых приходится 47.5% от суммы слоистых силикатов, в подчиненном количестве присутствуют Fe, Mg-хлорит – 19.2%, мусковит с большими размерами доменов (до 40 слоев) – 13.3%, хлорит-сметтит – 10.0%, вермикулит – 5.0% и каолинит – 5.0%. В составе слоистых силикатов голоцена

(обр. 7–8 см) преобладают Mg, Fe-хлорит и смешанослойный хлорит-сметтит, суммарное содержание которых составляет 45.8% от общего количества слоистых силикатов, иллит-сметтит не обнаружен, в подчиненном количестве установлены иллит – 28.1%, вермикулит – 14.4%, мусковит – 6.7% и каолинит – 5.0%. За исключением мусковита, присутствующие глинистые минералы тонкодисперсны, они имеют малые размеры доменов (от 5 до 15 слоев).

Детальное изучение состава образцов донных отложений методом СЭМ подтвердило, что преобладающими минералами в них являются полевые шпаты (битовнит, андезин, олигоклаз и в меньшей степени калиевый полевой шпат), кварц, амфибол (актинолит), хлорит с переменным содержанием Fe и Mg. В подчиненном количестве присутствуют мусковит, встречаются биотит, пироксен (авгит), эпидот. Акцессорные минералы представлены апатитом, ильменитом, титанитом, цирконом, магнетитом. Отмечаются сростания зерен ильменита, титанита, рутила, изредка – монацита, пирита, торита.

Помимо отложений ледника и пород водосборного бассейна потенциальным источником вещества в озерных осадках могли служить продукты извержений близкорасположенных вулканов [5]. Отдельных прослоев тефры в донных отложениях оз. Хикушка нами не обнаружено. Этот факт может объясняться рядом причин. Во-первых, господствующие ветры не способствовали переносу значительного количества пепла в направлении озера; во-вторых, сами извержения могли быть слабоэксплозивными. Наконец, в-третьих, тот пирокластический материал, который все же попадал в осадок, мог в результате вторичных преобразований в значительной степени замещаться глинистыми минералами. Тем не менее в некоторых горизонтах (47 и 89 см) методом СЭМ были обнаружены шестоватые агрегаты пироксена в сростании с оливином, а также отдельные крупные (более 100 мкм) шестоватые агрегаты в горизонтах 71 и 95 см, при этом пироксен имеет довольно постоянный состав, близкий авгиту. В горизонте 47 см наблюдаются крупные выделения биотита с высоким (до 3%) содержанием бария в сростании с пироксеном. Согласно статье [16], бариевый биотит – специфический минерал преимущественно калиевых изверженных горных пород. При сопоставлении составов полевых шпатов, установленных в донных отложениях оз. Хикушка и представленных в основном плагиоклазами от альбита до битовнита, с составом полевых шпатов лавового поля Жом-Болок выявленные отличия невелики (рис. 4). Кроме того, в кровле разреза (0–18 см) отмечаются повышенные концентрации TiO_2 и P_2O_5 (рис. 1), что может объясняться дополнительным привнесением титана и фосфора в составе пеплового материала.

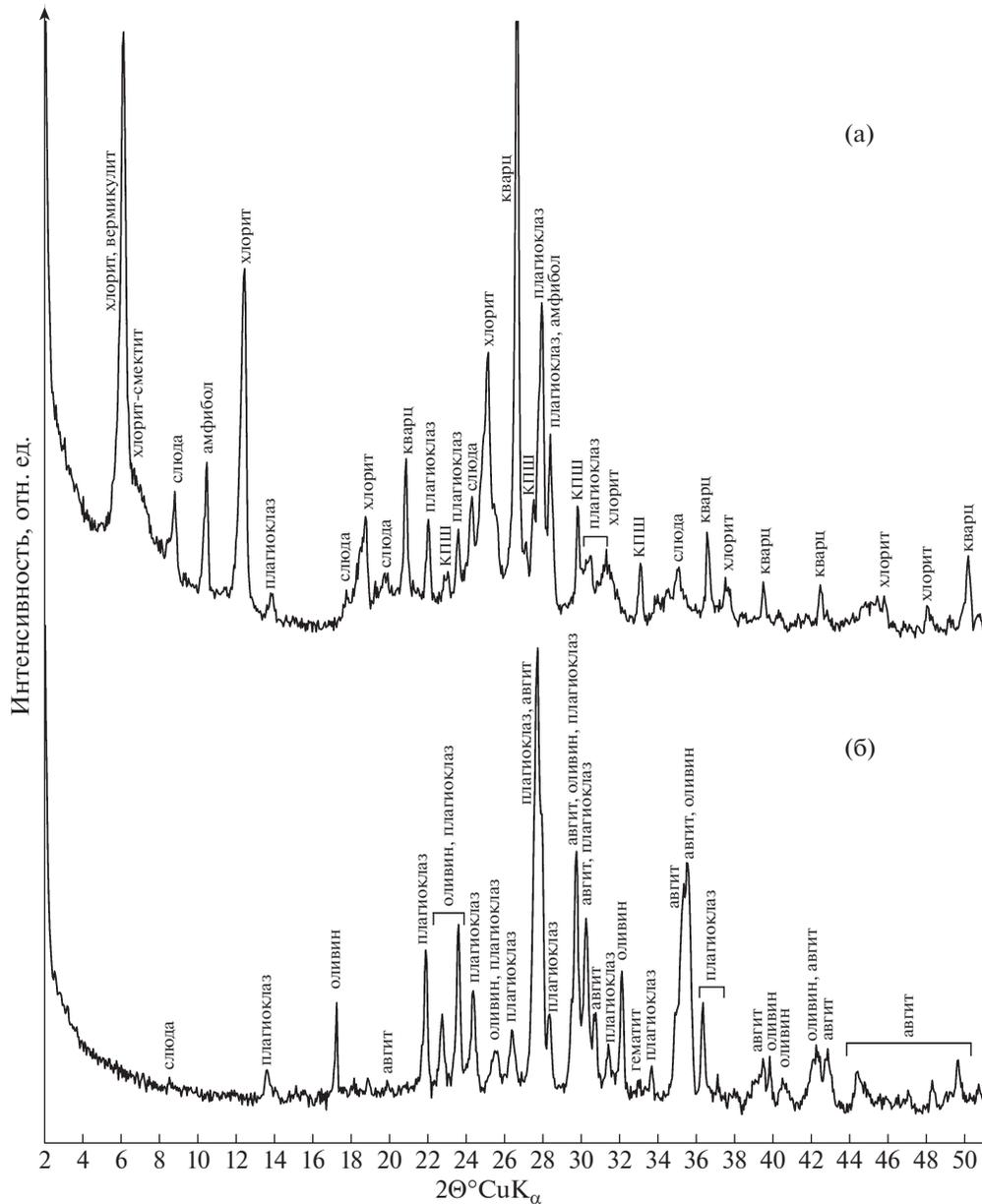


Рис. 2. Дифрактограммы образцов донных отложений оз. Хикушка 39–40 см (а) и базальтов Жом-Болокского вулканического поля (б).

Результаты комплексного изучения донных отложений озера Хикушка позволили выделить 5 стадий его эволюции.

Стадия I (124–88 см, 13 800–11 700 л.н.) характеризует начало формирования оз. Хикушка. В это время повышается уровень летней инсоляции [17]. В изучаемом районе происходит активное таяние локального ледника и образование карового озера. Большую часть года озеро было покрыто льдом. В остальное время года вода, вероятно, оставалась насыщенной мелкодисперсной минеральной взвесью, препятствовав-

шей развитию диатомовых и, соответственно, образованию биогенного кремнезема (рис. 1). В осадках накапливаются тонкодисперсные (размеры доменов 4–15 слоев) глинистые минералы – иллит и смешанослойный иллит-сметтит (до 50% от суммы слоистых силикатов) и Fe, Mg-хлорит (рис. 3), которые могут иметь как аутигенное, так и аллотигенное происхождение.

В стадию II (88–62 см, 11 700–10 000 л.н.) с наступлением голоценового потепления в озере начинают накапливаться биогенно-терригенные илы. К этому времени ледник растаял, и основ-

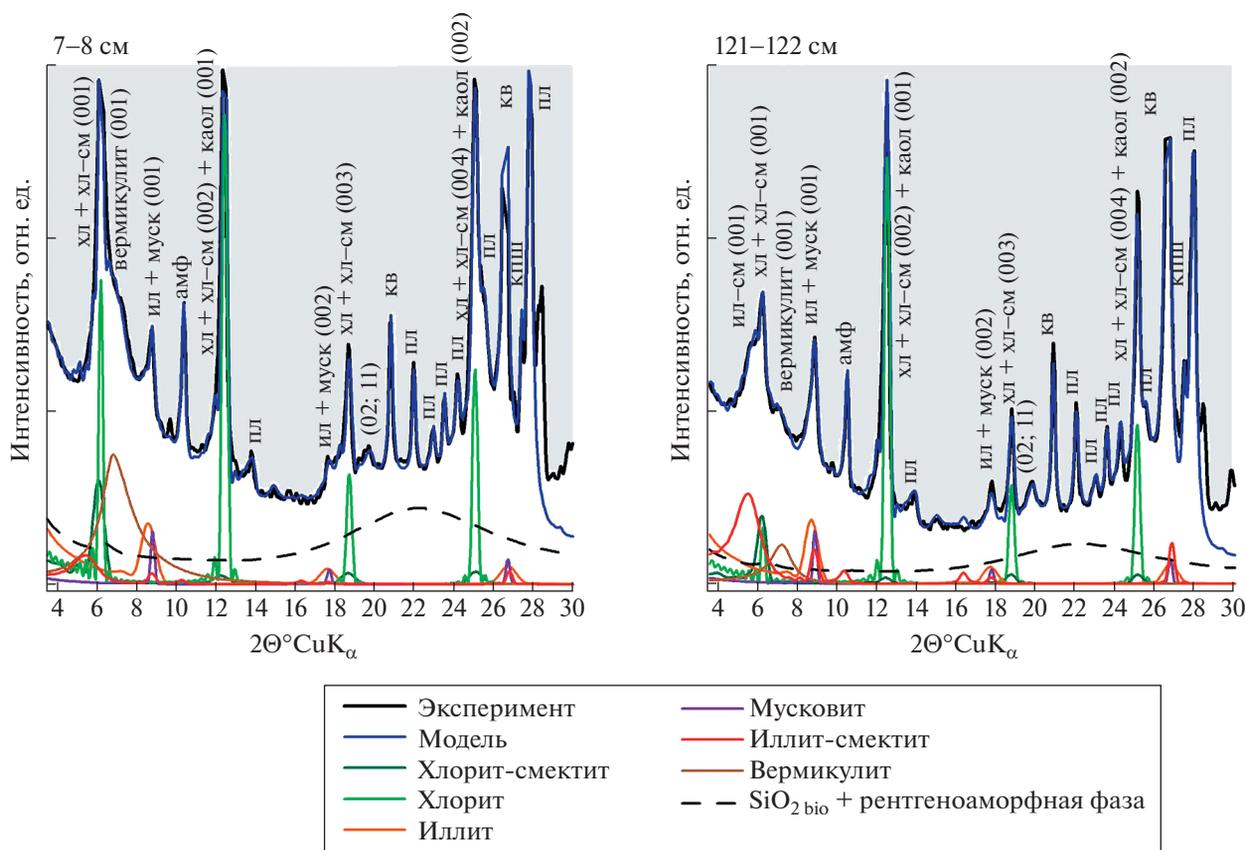


Рис. 3. Результаты моделирования XRD-профилей слоистых силикатов в образцах оз. Хикушка: голоцен – 7–8 см, верхний плейстоцен – 121–122 см.

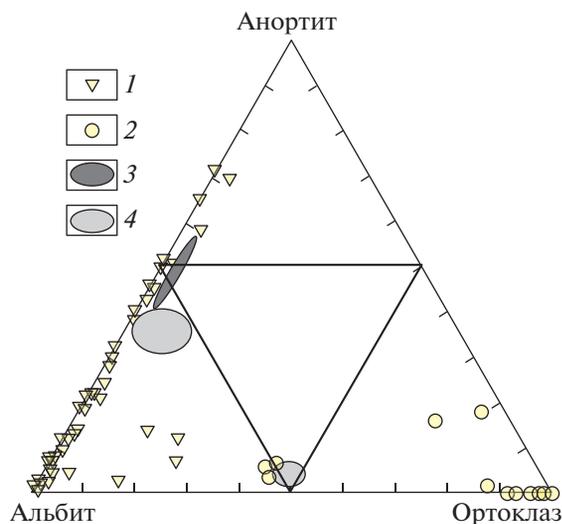


Рис. 4. Диаграмма составов полевых шпатов донных отложений оз. Хикушка по данным СЭМ в сравнении с составом вкрапленников и микролитов лавового потока Жом-Болок [4]. 1 – плагиоклазы осадков; 2 – калиевые полевые шпаты осадков; 3 – область составов вкрапленников плагиоклазов в трахибазальтах; 4 – область составов микролитов плагиоклазов в трахибазальтах.

ными источниками питания озера стали талые и дождевые воды. Изменение режима питания привело к снижению уровня воды в озере. Эта стадия характеризуется благоприятными условиями для развития экосистемы водоема, что согласуется с общим потеплением климата северного полушария и наступлением более теплых летних сезонов из-за орбитально-обусловленного повышения летней инсоляции. Растет содержание $\text{SiO}_{2\text{bio}}$, среди слоистых силикатов преобладают Mg, Fe-хлориты и хлорит-сметиты – продукты выветривания коренных пород обрамления озера.

В стадию III (62–33 см, 10000–6000 л.н.) снижаются концентрации $\text{SiO}_{2\text{bio}}$ (рис. 1), что предполагает формирование менее продуктивной системы оз. Хикушка. На фоне уменьшения количества иллита и отсутствия иллит-сметита растет содержание хлорит-сметита и хлорита (до 55% от суммы слоистых силикатов). Эта стадия характеризуется максимальной активностью влажного азиатского муссона, повышением общего увлажнения [1], что приводило к выпадению обильных зимних осадков и охлаждению вод озера.

Стадия IV (33–18 см, 6000–3000 л.н.) характеризуется ослаблением влияния влажного азиат-

ского муссона. Озеро постепенно мелеет и лучше прогревается, что могло быть благоприятно для расцвета диатомовых, обогащающих отложения биогенным кремнеземом (рис. 1), и аутигенного минералообразования.

Стадия V (18–0 см) охватывает период от 3000 л.н. до современности. Судя по снижению концентрации $\text{SiO}_{2\text{bio}}$, эта стадия характеризуется более суровыми природно-климатическими обстановками, чем предыдущая. В осадках отмечается высокое содержание иллита и хлорита (~55% от суммы слоистых силикатов). Именно на эту стадию приходится последний этап вулканической активности в Жом-Болокском районе.

В результате проведенных исследований установлено, что климатический фактор оказал основное влияние на позднеплейстоцен-голоценовое осадконакопление в высокогорном оз. Хикушка. Климат контролировал такие процессы, как деятельность ледников, выветривание и перенос осадочного материала с территории водосбора, колебания уровня воды в озере, биопродуктивность озерной системы. Позднечетвертичный вулканизм, несмотря на близкое расположение очагов его проявления, играл второстепенную роль в процессах озерной седиментации. Первые результаты изучения ассоциаций слоистых силикатов, их соотношений в разрезе и кристаллохимических характеристик в отложениях озера Хикушка стали важными источниками новой информации о позднечетвертичной истории природной среды Жом-Болокского вулканического района.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по государственным заданиям ИГМ СО РАН и ИГХ СО РАН, а также при поддержке РФФИ (гранты № 19-05-00219, № 19-05-00328, № 20-05-00247, РФФИ-Лондонское Королевское Общество № 21-55-10001) и РФФ (№ 19-17-00099, № 19-17-00216).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mackay A.W., Bezrukova E.V., Leng M.J., Meaney M., Nunes A., Piotrowska N., Self A., Shchetnikov A., Shilland E., Tarasov P., Luo Wang, White D. Aquatic Ecosystem Responses to Holocene Climate Change and Biome Development in Boreal, Central Asia // *Quaternary Science Reviews*. 2012. V. 41. P. 119–131.
2. Безрукова Е.В., Щетников А.А., Кузьмин М.И., Шарова О.Г., Кулагина Н.В., Летунова П.П., Иванов Е.В., Крайнов М.А., Кербер Е.В., Филинов И.А., Левина О.В. Первые данные об изменении природной среды и климата Жомболоского вулканического района (Восточный Саян) в среднем-позднем голоцене // *ДАН*. 2016. Т. 468. № 3. С. 323–327.
3. Shchetnikov A.A., Bezrukova E.V., Krivonogov S.K. Late Glacial to Holocene Volcanism of Jom-Bolok Valley (East Sayan Mountains, Siberia) Recorded by Microtephra Layers of the Lake Kaskadnoe-1 Sediments // *Journal of Asian Earth Science*. 2019. V. 173. P. 291–303.
4. Ярмолюк В.В., Никифоров А.В., Иванов В.Г. Строение, состав, источники и механизм долинных излияний лавовых потоков Жом-Болок (голоцен, Южно-Байкальская вулканическая область) // *Вулканология и сейсмология*. 2003. № 5. С. 41–59.
5. Ivanov A.V., Arzhannikov S.G., Demonterova E.I., Arzhannikova A.V., Orlova L.A. Jom-Bolok Holocene Volcanic Field in the East Sayan Mts., Siberia, Russia: Structure, Style of Eruptions, Magma Compositions, and Radiocarbon Dating // *Bulletin of Volcanology*. 2011. V. 73. P. 1279–1294.
6. Аржанникова А.В., Жоливе М., Аржанников С.Г., Вассалло Р., Шове А. Возраст формирования и деформации мезозойско-кайнозойской поверхности выравнивания в Восточном Саяне // *Геология и геофизика*. 2013. Т. 54. № 7. С. 894–905.
7. Щетников А.А., Безрукова Е.В., Филинов И.А., Иванов Е.В., Кербер Е.В. Озерный морфолитогенез в долине вулканов (Восточный Саян) // *География и природные ресурсы*. 2016. № 3. С. 33–38.
8. Гордиенко И.В., Рошкеттаев П.А., Гороховский Д.В. Окинский рудный район Восточного Саяна: геологическое строение, структурно-металлогеническое районирование, генетические типы рудных месторождений, геодинамические условия их образования и перспективы освоения // *Геология рудных месторождений*. 2016. Т. 58. № 5. С. 405–429.
9. Солотчина Э.П. Структурный типоморфизм глинистых минералов осадочных разрезов и кор выветривания. Новосибирск, Академ. изд-во “Гео”, 2009. 234 с.
10. Solotchin P.A., Solotchina E.P., Bezrukova E.V., Zhdanova A.N. Climate Signals in the Late Quaternary Bottom Sediments of Lake Baunt (Northern Transbaikalia) // *Russian Geology and Geophysics*. 2020. V. 61. № 10. P. 1146–1155.
11. Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Haflidason H., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scot E.M., Southon J.R., Staff R.A., Turney C.S.M., van der Plicht J. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50,000 Years cal BP // *Radiocarbon*. 2013. V. 55. № 4. P. 1869–1887.
12. Дриц В.А., Коссовская А.Г. Глинистые минералы: смектиты, смешанослойные образования. М.: Наука, 1990. 214 с.
13. Дриц В.А., Коссовская А.Г. Глинистые минералы: слюды, хлориты. М.: Наука, 1991. 175 с.
14. Velde B. Composition and Mineralogy of Clay Minerals // *Origin and Mineralogy of Clays*. Velde B., ed. Springer-Verlag, 1995. P. 8–41.

15. Япаскурт О.В. Генетическая минералогия и стадийный анализ процессов осадочного породо- и рудообразования. М.: ЭСЛАН, 2008. 356 с.
16. Кориневский В.Г., Кориневский Е.В., Кориневская Г.Г. Бариевый биотит из Ильмен // Записки Российского минералогического общества. 2005. № 2. С. 75–83.
17. Berger A., Loutre M.F. Insolation Values for the Climate of the Last 10 Million Years // Quaternary Science Reviews. 1991. V. 10. P. 297–317.

NEW DATA ON LATE QUATERNARY SEDIMENTATION IN HIGH-MOUNTAIN KHIKUSHKA LAKE (EASTERN SAYAN): ROLE OF CLIMATIC AND VOLCANIC FACTORS

**P. A. Solotchin^{a,#}, Academician of the RAS M. I. Kuzmin^b, E. P. Solotchina^a, E. V. Bezrukova^b,
V. D. Strakhovenko^{a,c}, A. A. Shchetnikov^{b,d,e,f}, and A. N. Zhdanova^a**

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

^b A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Irkutsk, Russian Federation

^c Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

^d Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Irkutsk, Russian Federation

^e Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

^f Geological institute, Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation

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

We present the results of a comprehensive study of Late Pleistocene-Holocene sediments from the Khikushka Lake located in the high-mountain Zhom-Bolok volcanic area (East Sayan Mountains). The lake is freshwater, closed and has a glacial origin; the age of sediments is ~13.8 ka. The sediments were studied by X-ray diffractometry (XRD), IR spectroscopy, laser granulometry, scanning electron microscopy, X-ray fluorescence analysis, AMS dating. For the first time detailed mineralogical studies of Khikushka Lake sediments were performed. It was shown that feldspars, quartz, phyllosilicates, and amphibole prevail in them. Mathematical modeling of complex XRD patterns made it possible to identify chlorite, illite, illite-smectite, chlorite-smectite, muscovite, vermiculite, and kaolinite among the phyllosilicates. The quantitative ratios of these minerals change significantly from Pleistocene to Holocene. Despite the close proximity of the volcanoes and multi-stage Late Quaternary eruptions in the Zhom-Bolok area only indirect signs of the presence of pyroclastic material were found in the lacustrine sediments. Based on the mineralogical, crystallochemical, lithological, geochemical studies a number of evolutionary stages of the Lake Khikushka basin were identified. Sedimentation in this basin occurred under the influence of both climatic (glacier activity, lake level fluctuations, its bioproductivity) and geological (composition of catchment rocks, late Quaternary volcanism) factors.

Keywords: lacustrine sediments, clay minerals, modeling of XRD patterns, Late Pleistocene Holocene, paleoclimate, volcanic activity, Eastern Sayan