

ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РОССИИ:
ОТ КАЛИНИНГРАДА ДО КАМЧАТКИ

УДК 556.55:551.312.4(235.222)

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ДОННЫХ
ОТЛОЖЕНИЙ МАЛЫХ ОЗЕР ПЛАТО УКОК (ГОРНЫЙ АЛТАЙ)[#]

© 2023 г. В. Д. Страховенко^{1,*}, Г. И. Малов¹, Е. А. Овдина¹, В. И. Малов¹

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

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

Поступила в редакцию 14.03.2023 г.

После доработки 18.05.2023 г.

Принята к публикации 08.09.2023 г.

В межгорных котловинах и на высокоподнятых плато Алтая в пределах непосредственного распространения оледенения в неоплейстоцене возникали многочисленные современные озера. О геохимических процессах аутигенного минералообразования в озерных системах в условиях нивального седиментогенеза информации практически нет. Изучение кернов донных отложений восьми высокогорных озер Алтая показало, что воды озер пресные гидрокарбонатные с вариациями катионного состава Са–Na. Донные отложения озер характеризуются разными соотношениями минерального обломочного материала, аутигенных минералов (кальцит, гипс, пирит, иллит) и мортмассы растительных остатков. В донных отложениях озер, расположенных в пределах одной котловины (Бертекской или Тархатинской), абсолютные концентрации элементов отличаются в пределах одного стандартного отклонения, за исключением значительных вариаций содержаний отдельных элементов (Mo, U, Li, Be). Обогащение донных отложений озер (Аргамджи, Теплый ключ, Красное) этими элементами связано с присутствием рудных концентраций (Mo, U, Li, Be) на локальных водосборных территориях отдельно взятого озера. Минеральные ассоциации донных отложений изученных озер отличаются друг от друга составом аутигенных минералов и от горных пород, почв водосборных площадей составом слоистых силикатов. В составе тонкочешуйчатых, спутанно-волокнистых агрегатов иллита донных отложений, количество железа в 2–4 раза больше, чем в составе пластинчатых агрегатов слюд, хлоритов из горных пород, почв водосборных площадей. Криогенные процессы определили кристаллизацию гипсовых конкреций в донных осадках озер Аргамджи, М. Тархатинское и кальцитовых агрегатов в Зерлюколь-Нур и Б. Тархатинское в значительных объемах при пресном составе вод.

Ключевые слова: нивальный седиментогенез, донные отложения, малые озера, Горный Алтай, минералогия, геохимия

DOI: 10.31857/S2949178923040138, **EDN:** GMDPBK

ВВЕДЕНИЕ

Территориальное расположение Алтайских гор предопределило климатические закономерности, диктующие условия эволюции горного оледенения и большого количества озер. Глубокое внутриконтинентальное положение горной страны; господство сибирского антициклона, центр которого почти совпадает с географическим положением центра материка, длительный период радиационного выхолаживания благоприятствуют развитию мощной инверсии температуры и застою переохлажденного воздуха в межгорных впади-

нах, что препятствует воздухообмену с приходящими воздушными массами. Продолжительный холодный период, который увеличивается с высотой и вглубь гор, очень неглубокое залегание верхней границы многолетней мерзлоты на обширных тундровых, остепненных пространствах обуславливают слабую фильтрацию атмосферных осадков и, вследствие этого, — сильное заболачивание поверхности. Так как ведущая роль в становлении и развитии озерных систем Алтая принадлежит оледенению, то наибольшее количество озер расположено в его юго-восточной части, где сконцентрировано около 76% всех озер (максимум озер приходится на Тархатинско-Джазаторский район, исследования в котором представлены в данной работе) (Михайлов, 1995). Многочисленные морено-подпрудные, каровые и термокарстовые водоемы, локализованные в долинах и небольших внутригорных впадинах,

[#] Ссылка для цитирования: Страховенко В.Д., Малов Г.И., Овдина Е.А., Малов В.И. (2023). Минеральный состав и условия формирования донных отложений малых озер плато Укок (Горный Алтай) // Геоморфология и палеогеография. Т. 54. № 4. С. 207–225. <https://doi.org/10.31857/S2949178923040138>; <https://elibrary.ru/GMDPBK>

возникали в пределах непосредственного распространения оледенения (Бородавко, 2009). Донные отложения озер являются важнейшим источником информации о локальных и региональных природных изменениях.

На протяжении многих лет наиболее полные работы по палеолимнологии Русского Алтая выполнены по самому большому из озер — Телецкому (Калугин и др., 2007; Селегей, Селегей, 2010 и др.). Также изучены экосистемы озер Ая, Манжерок, Мултинской группы и некоторых других. Однако в общем можно отметить, что во всех статьях внимание в основном уделяется проблемам эвтрофности озер, степени водности и биоте и отсутствуют работы по изучению минерального состава донных отложений. В то же время значение геологического строения и криолитогенеза в развитии рельефа чрезвычайно велико для территорий России. Для арктических морей и прилегающих к ним континентальных территорий получены новейшие данные о строении криолитосферы и ее компонентов, детально изучены литологический состав горных пород и геоморфологические особенности в связи с промерзанием и протаиванием горных пород (Криолитогенез, 2021 и др.). Однако до настоящего времени не существует обобщающих представлений о криогенетическом осадкообразовании в горных озерах и о криоминералогенезе в частности.

Детальный анализ состава и строения донных отложений современных озер в горно-ледниковых долинах позволит получить информацию о седиментогенезе в современных природных условиях. Цель работы — выявить особенности формирования донных отложений малых озер плоскогорья Укок в условиях, когда ведущим геохимическим процессом преобразования горных пород, почв и грунтов является криогенез.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучаемая группа озер Укокского плоскогорья располагается на территории современного горно-ледникового центра, который представлен крупнейшими ледниками Сибири. Плоскогорье Укок образовано двумя котловинами — Бертекской и Тархатинской. По морфологическим и морфометрическим признакам в Бертекской котловине выделяют две впадины: восточную — Калгутинскую и западную — Акалахинскую. Днище Калгутинской впадины относительно выровненное, слабо заболоченное, с незначительным развитием термокарстового микрорельефа (где и располагаются озера) (Михайлов, Севастьянов, 1994; Рудой и др., 2000; Ганюшкин и др., 2017 и др.). Озеро Каровое имеет карстовое происхождение. Согласно данным Гидрометеослужбы, среднегодовое количество осадков на изучаемой тер-

ритории колеблется в пределах 160–290 мм/год, причем их большая часть (до 80%) выпадает летом, а среднегодовая температура колеблется от –7.6 до –9.5°C (Конищев, 2006). В котловине присутствуют озера разного размера и двух основных типов — термокарстовые и моренно-подпрудные. Котловины почти полностью выполнены моренными образованиями: самые нижние из которых имеют поздний неоплейстоценовый возраст, а самые верхние — это морены современных ледников (Федак и др., 2011; Ганюшкин и др., 2017). Из-за труднодоступности территорий плато Укок изучение вещественного состава донных отложений многочисленных озер не проводилось. Информация о химическом составе почв и поверхностных вод плоскогорья Укок в литературе встречается крайне мало, а о донных отложениях практически отсутствует (Ельчиногова и др., 2019; Пузанов и др., 2020). В высокогорных условиях для изучаемых районов Горного Алтая криогенез проявляет себя как ведущий процесс формирования почв и грунтов, а также как ведущий геохимический процесс преобразования горных пород (Конищев и др., 2006). Криогенные процессы связаны с фазовыми переходами воды в приповерхностных мерзлых породах (солифлюкция, десерпция (курумы), термокарст, пучение, морозобойное растрескивание, термоэрозия, наледи), образованием и разрушением кристаллогидратов солей; миграцией газов и флюидов, изменение их состава, свойств, строения, состояния и распределения в литосфере (Романовский, 1993). Все исследователи отмечают, что при вымораживании воды происходит увеличение ее минерализации, причем оно имеет ступенчатый характер, обусловленный неодинаковой величиной растворимости солей, различной скоростью ее понижения и различной начальной концентрацией растворенных веществ (Иванов, 1983; Конищев и др., 2005; Андрейчук и др., 2013; Ганюшкин и др., 2017; Фотиев, 2020 и др.). Изменение минерализации воды в процессе роста ледяного покрова в значительной степени зависит от глубины водоемов (Иванов, 1983; Фотиев, 2020 и др.). От мощности ледяного покрова зависит степень криогенного концентрирования. При таянии льда значительная часть новообразованных карбонатов и сульфатов не переходит в жидкую фазу и поэтому минерализация талой воды всегда меньше минерализации воды до кристаллизации, т.е. происходит ее криогенное опреснение (Конищев и др., 2005; Андрейчук и др., 2013; Фотиев, 2020 и др.). Важно отметить, что именно в малых озерах (<1 км²) преобладает спокойный режим осадконакопления, который обеспечивается равномерной морфометрией дна и береговой линии и отсутствием фракционирования частиц по мере удаления от берега. В силу небольших глубин наблюдается полное ветровое перемешивание.

На плоскогорье Укок горные породы представлены разновозрастными отложениями палеозойской, мезозойской и кайнозойской эр. Отложения четвертичного периода представлены всеми генетическими типами ледниковых, водно-ледниковых, склоновых, аллювиальных, озерно-аллювиальных, ледниково-озерных и болотных осадков. Большие площади на плоскогорье Укок занимают изверженные породы. В геохимическом плане изучаемые озера (перевал Теплый ключ, Каровое, Калгутинское, Аргамджи) находятся в пределах Калгутинской рудно-магматической системы. Калгутинский медно-редкометалльно-молибден-вольфрамовый рудный узел приурочен к одноименной крупной вулканотектонической структуре, сложенной терригенно-вулканогенными покровными и субвулканическими образованиями трахиандезит дацитриолитового аксайского комплекса (Анникова и др., 2004; Поцелуев и др., 2006; Соколова и др., 2011; Федак и др., 2011 и др.) (рис. 1). С гранитоидными массивами связана водоносная зона трещиноватости. Выходы на поверхность термальных вод известны в верховьях р. Жумалы, в бассейне р. Джасатер. Воды Джумалинского геотермального источника “Джумалинские теплые ключи” выходят на южном склоне Северо-Чуйского хребта (абс. отметка 2320 м) в долине р. Жумалы (приток р. Джазатор, бассейн р. Аргут) из тектонически нарушенных риолитов нижнего девона, детальная информация об этом источнике опубликована в статьях (Федак и др., 2011; Паничев и др., 2022). Водное питание в зоне осуществляется за счет атмосферных осадков и талых вод. Подземные воды (10–15 л/с), проходя через толщу многолетнемерзлых ледниковых отложений, имеют на выходе температуру +19.8°C и гидрокарбонатно-натриевый состав. Концентрация ряда металлов (литий, бериллий, бор, молибден, мышьяк, сурьма, вольфрам, свинец, уран) в водах источника превышает от десятков до тысяч раз их содержания в водах местных рек (Федак и др., 2011; Паничев и др., 2022).

Самым высокогорным является озеро на перевале *Теплый ключ*, котловина которого находится среди порфировидных биотитовых гранитов и мелкозернистых лейкогранитов, калгутитов (табл. 1). Озеро *Калгутинское* располагается в пойме р. Калгуты в пределах юго-западного Калгутинского рудного поля. Озеро *Каровое* расположено в каре, в пределах Джумалинского штока. Озеро *Аргамджи* находится в пойме р. Аргамджи в 1 км от ее устья, исток данной реки расположен в пределах Аргамджинского штока. Озеро *Красное* располагается в пойме р. Жумалы (исток которой располагается в пределах Джумалинского штока) среди девонских вулканогенно-осадочных отложений. Озера *Б. и М. Тархатинские* находятся в Тархатинской котловине. Во время последнего

оледенения она представляла собой ледоем (Русанов, 2005). В конце позднего неоплейстоцена в центре котловины образовалось одноименное моренно-подпрудное субшироотно ориентированное озеро (Тархатинское). В настоящее время уровень воды оз. Б. Тархатинское находится на абс. отметке 2326 м. С востока оно ограничено широким моренным валом, состоящим из скопления перлювиальных валунов и глыб, вымытых из морены. При максимальном уровне озера сток из него происходил к северу от дороги КошАгач – Джазатор, где до сих пор сохранилось реликтовое озерко (М. Тархатинское) (Русанов, 2005). Кроме моренных и озерных отложений в депрессиях оз. Б. и М. Тархатинское и оз. *Зерлюколь-Нур* выходят девонские вулканогенно-осадочные отложения: кислые и основные эффузивы, их туфы, прослои песчаников, известняков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Полевые исследования. Для детального изучения геохимического и минерального состава озерных отложений выполнен отбор кернового материала в 8 высокогорных (выше 2300 м. над у. м.) озер Укокского плоскогорья (озера Б. и М. Тархатинское, Зерлюколь-Нур, Красное, перевал Теплый ключ, Каровое, Калгутинское, Аргамджи), получено 12 кернов донных осадков (рис. 1). Площадь озер не превышает 1 км² (табл. 1). Отбор водных проб производился по стандартным методикам (ГОСТ 31861, 2012). Первичные полевые измерения физико-химических и гидрологических показателей, отбор проб воды и донного осадка (цилиндрическим пробоотборником с вакуумным затвором конструкции НПО “Тайфун” (диаметр 82 мм, длина 50 см)) проведены на озере с ПВХ-лодки “Stormline Adventure”. Переменные параметры pH, Eh, взвешенное вещество (ВВ) определяли с помощью портативного анализатора жидкости серии “АНИОН-7000”, Россия; кондуктометрическим методом определяли удельную электропроводность и общую минерализацию воды; O₂-методом определения биохимического потребления кислорода за пять суток (БПК₅). Определение БПК₅ проводилось в первоначальной пробе по разности между содержанием кислорода до и после инкубации в течение пяти суток без доступа кислорода и света (измерение производили сотрудники ИВЭП СО РАН). Отобрано 119 проб поверхностной озерной воды, 141 проба донных осадков, 11 проб биоты; 7 проб талой (снеговой) воды и 4 дождевой воды отобраны в марте 2020 г. и августе 2019 г. соответственно. Керна донных отложений опробован с шагом 3 см на глубину до 120 см. Перед выбором места опробования проведены предварительные исследования основных характеристик рельефа дна озер с использованием эхолота Garmin ECOMAP Plus 62CV. С при-

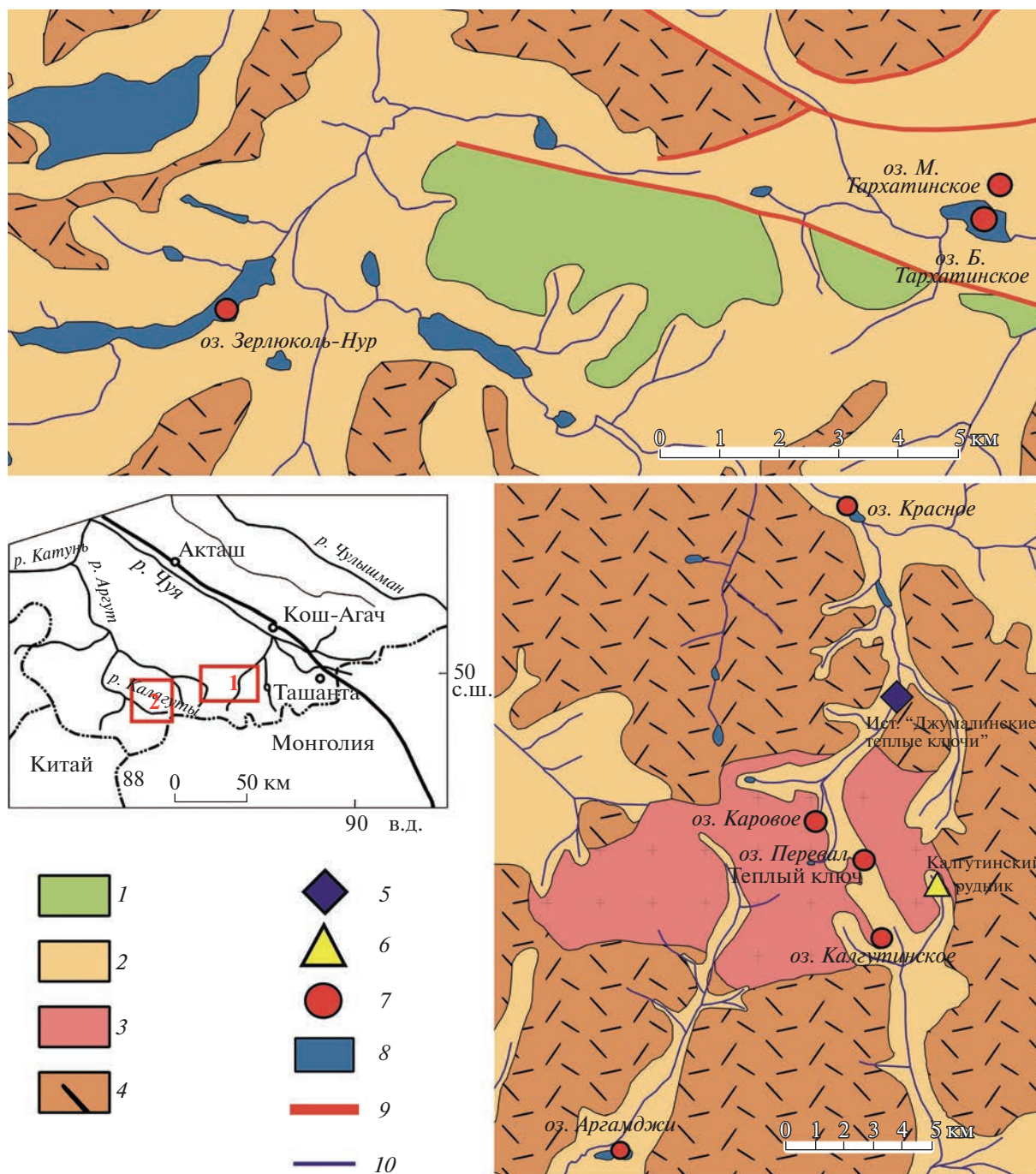


Рис. 1. Геологическая карта района исследований с вынесенными точками пробоотбора озер по данным (Геологическая ..., 2009; Карта четвертичных ..., 2009).

1 – нижнесилурийские песчаники, сланцы, известняки; 2 – четвертичные ледниковые отложения; 3 – граниты Калгутинского массива; 4 – девонские кислые и основные эффузивы, их туфы, прослои песчаников, известняков; 5 – источник “Джумалинские теплые ключи”; 6 – рудник; 7 – объекты исследования; 8 – озера; 9 – четвертичные разрывные нарушения; 10 – реки.

Fig. 1. Geological map of the research area with the sampling points of lakes according to the data (Geological ..., 2009; Map of Quaternary ..., 2009).

1 – Lower Silurian sandstones, shales, limestones; 2 – Quaternary glacial deposits; 3 – Granites of the Kalgutinsky massif; 4 – Devonian acidic and basic effusions, their tuffs, interlayers of sandstones, limestones; 5 – Ist. Jumalinsky; 6 – mine; 7 – objects of research; 8 – lakes; 9 – Neogene-quaternary discontinuities; 10 – rivers.

Таблица 1. Общая информация об исследованных озерах и отборе проб
Table 1. General information about the lakes studied and sampling

Озеро	Координаты		S, га	Глубина озера, м	Высота над у. м., м	Глубина отбора проб, м	Год отбора	Зольность донного осадка
	с.ш.	в.д.						
Б. Тархатинское	49.571361	88.384136	50.5	6	2320	4	2011	65
						6	2019	63
М. Тархатинское	49.575882	88.387999	4.6	2	2325	2	2011	50
						1.5	2019	54
Зерлюколь-Нур	49.553670	88.192046	154	3.2	2312	2.8	2019	66
						1.5	2019	69
Красное	49.514795	88.031348	22.3	1.5	2374	1.3	2019	82
Теплый ключ	49.406783	88.037772	3.1	3.8	2900	3.8	2011	84
						3.6	2019	88
Каровое	49.419607	88.013568	2.2	1.7	2800	1.5	2011	94
Калгутинское	49.383795	88.045843	1.8	4.5	2700	4.2	2011	64
						3.0	2011	58
Аргамджи	49.317372	87.925166	9.1	1.5	2376	1.5	2019	47
						1.0	2019	56

бойной береговой линии озер отобраны 8 проб песка. Отобраны 2 пробы речной воды в реках Джасатор, Жумала и 2 пробы воды источников “Джумалинские теплые ключи”.

Отбор проб почвы проводился в соответствии с генетическими горизонтами на 12 разрезах (64 образца) методом трансект-катен. В почвах выделены следующие горизонты: Ag – гумусовый горизонт, образовавшийся в результате гумификации растительных остатков; A – гумусово-аккумулятивный горизонт; ниже B – иллювиальный горизонт и почвообразующий C (Герасимова и др., 2013). Образцы почв по генетическим горизонтам берут из разрезов, заложенных в наиболее информативных местах, и так, чтобы данная почва была типична для максимальной части исследуемой территории. Все пробы почв высушивались и взвешивались.

Аналитические исследования. Определение химического состава образцов воды, почв, горных пород, донных осадков выполнены в ИГМ СО РАН и ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, г. Новосибирск и Госатомнадзоре. Донный осадок непосредственно после отбора взвешивался и далее высушивался до воздушно-сухого состояния в лабораторных условиях (либо в помещении при комнатной температуре для дальнейшего определения содержания ртути, либо в сушильном шкафу (LOIP LF 240/300-VS1, Россия с базовым модулем управления TS87B) при $T = 50^{\circ}\text{C}$ для определения макро- и микроэлементов), тщательно перемешивался и заново взвешивался, затем анализировался из навески стандартного

объема. Изучение зольности донных отложений, почв проводили путем прокаливания 50 г образца при 550°C (Аналитические..., 2017). Зольностью называют процентное содержание золы в отношении к сухому веществу.

Для определения макрокатионов (натрия, калия, кальция, магния) и макроанионов (хлорида, сульфата, нитрита, нитрата, фторида, фосфата) в воде применяли метод капиллярного электрофореза с косвенным фотометрическим детектированием на длине волны 252 нм на фоне электрофоретических буферов, содержащих бензимидазол (определение катионов) и бихромат-ион (определение анионов). Определение гидрокарбонат-ионов проводили титриметрическим методом. Микроэлементы определяли методом атомно-абсорбционной спектrophотометрии в вариантах пламенной и электротермической атомизации (Hitachi 8000, Япония; Perkin Elmer Zeeman 3030 – HGA 600). Минерализацию оценивали расчетным путем как сумму содержания неорганических веществ в растворе. При анализе ионного состава использовали методы ионной хроматографии (концентрация ионов аммония, натрия, калия, фторидов, хлоридов, нитратов и сульфатов), кислотно-основного титрования (общая Alk и карбонатная $Alk_{\text{карб}}$ щелочность), комплекснометрического титрования (сумма кальция и магния), pH-метрии (pH) и кондуктометрии (удельная электропроводность χ).

Макро- (Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, Ti, P) и микро-элементный состав (Cd, Pb, Cu, Zn, Mn, Cr, Ni, Co, V, Hg, Be, Ba, Sr, Li, Th, U, Rb, Cs, Hf, Ta,

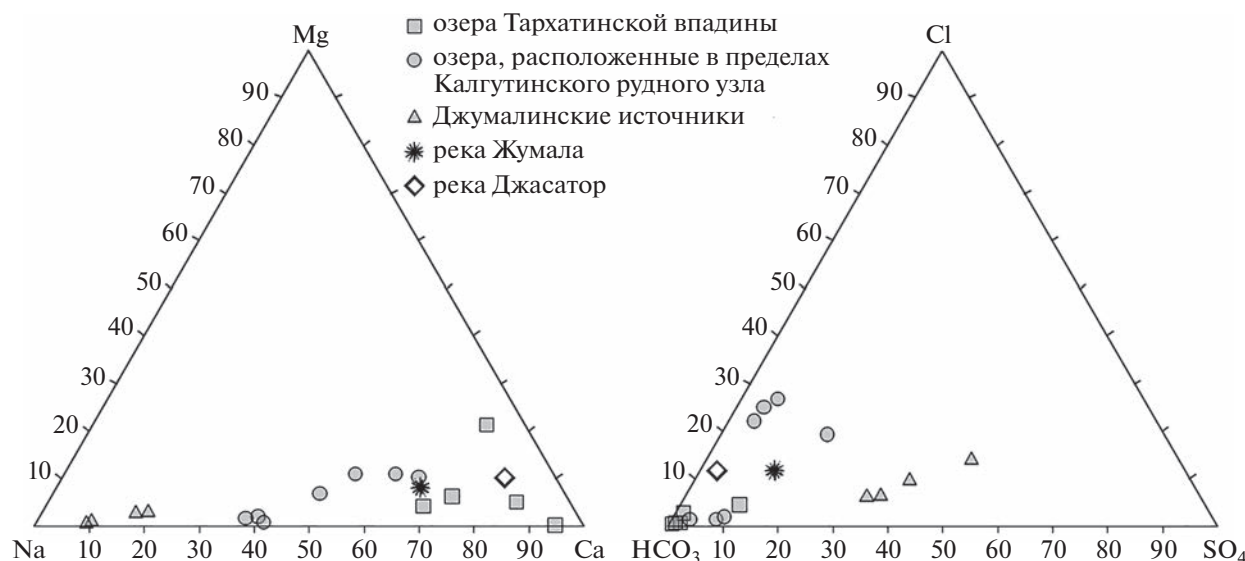


Рис. 2. Диаграммы катионного и анионного состава вод изученных озер.

Fig. 2. Diagrams of the cationic and anionic composition of the waters of the studied lakes.

TR+Y) проб донных отложений, почв, горных пород определялся атомно-абсорбционным методом с использованием пламенных и электро-термических методов атомизации (Solaar M6, Thermo Electron Corporation) и ИСП-МС. Минеральный состав исследовался с помощью рентгеноструктурного анализа на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA. Изучение морфологии, фазового и химического состава проб проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа MIRA 3 TESCAN. Детальное описание методов приведено в ранее опубликованных авторами статьях (Страховенко и др., 2014; Таран и др., 2018). Точность и воспроизводимость анализов определялись с использованием стандартных образцов и повторным определением отдельных проб.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Воды озер. В исследованных озерах формируются пресные (от 9 до 283 мг/л) гидрокарбонатные воды с вариациями катионного состава Ca—Na (рис. 2). В катионном составе вод озер Тархатинской котловины Ca значительно преобладает над Na, а в водах озер Калгутинской котловины количество Ca—Na сопоставимо, за исключением оз. Аргамджи (табл. 2). Воды озера Аргамджи сходны с составом вод источников “Джумалинские теплые ключи”: воды гидрокарбонатно-натриевые с повышенным содержанием серы. В составе снеготалых вод основными катионами являются Ca и Na, как в Тархатинской, так и в Калгутинской котловинах. Воды озер щелочные — (pH от 7.3 до 9.4), показатель Eh воды всех озер

положительный, высокий, при этом содержание растворенного в воде O_2 варьирует от 6.1 мг/л до 6.8 мг/л (Зарубина, Феттер, 2022). В водах изученных озер концентрации большей части изученных микроэлементов имеют тот же порядок величин, что в реках мира, о чем можно судить по сводке, сопоставив наши данные с данными, из статьи А.В. Савенко и соавт. (2020), за исключением ряда элементов (табл. 2). Для озер, расположенных в пределах Калгутинской рудно-магматической системы, выявлены повышенные концентрации Zn, Th, Mo, Be, F, Cu, Si (в оз. Аргамджи еще и U, Li) и значительно более низкие концентрации для Y и TR, Rb, Sr, Al, Mg, Ni, Cr относительно их содержаний в реках мира. Для озер, расположенных в Тархатинской котловине, установлены более высокие концентрации Zn, Fe, Mn, Ba, Th, TR и обеднение Al, Mo, Rb, Ni, Cr, Rb.

Почвы, горные породы. Почвы водосборных территорий изученных озер обеих котловин, горные породы, пески с береговой зоны озер обогащены Li, Sb, U и обеднены Ca, Sr, Ba, Pb, Hg (табл. 3). Только почвы характеризуются еще повышенными содержаниями Cd, а почвообразующий субстрат и пески обеднены Cu, Zn относительно их содержаний в почвах мира или верхней континентальной коры, составы которых для сравнения приведены в табл. 3. Почвы водосборных территорий озер, расположенных в Калгутинской котловине, почвообразующие породы, пески с береговой зоны обогащены Th, Be, Mo, K, Na и обеднены Fe, Mg, Al, V, а почвы водосборных территорий озер из Тархатинской котловины обогащены Fe, Mn, Ni, Co, Cr. Все остальные изученные элементы имеют тот же порядок величин,

Таблица 2. Химический состав вод озер и р. Жумалы (мкг/л) в сопоставлении с литературными данными
Table 2. Chemical composition of the waters of lakes and the Zhumala River (mcg/l) in comparison with the literature data

Химический состав	Оз. Б. Тархатинское	Оз. М. Тархатинское	Снет с Тархатинских озер	Оз. Зерноколь-Нур	Оз. Красное	Оз. Теплый ключ	Оз. Каровое	Оз. Калутинское	Снет с Калутинского рудника	Оз. Артамджи	Источник “Джумалинские теплые ключи” по (Паничев и др., 2022)	Р. Жумала	Реки мира по (Савенко и др., 2022)
Li	1.9	61	1	0.9	1.1	2.3	13	1.8	0.8	90	356	1.8	1.8
F	115	110	0.14	120	310	325	280	300	310	740	7	2430	100
Al	6	20	251	9	11	23	9	4	16	9	11	23	32
Mn	52	63	12	16	64	28	6	12	13	76	0	7	34
Fe	51	454	449	16	64	138	37	137	10	76	6	66	66
Cu	1.20	6.35	2.74	1.00	3.00	3.10	2.00	2.50	67	1.00	0.57	2.80	1.5
Zn	2.3	6.4	28.3	1.0	8.7	7.6	1.3	1.7	23	7.9	0.8	1.0	0.6
Sr	64	58	2	91	37	17	5	8	1	110	40	12	60
Ba	56	54	<2	11	5	18	3.9	5.5	4.0	45	0.5	5.9	23
Mo	1.0	1.0	н.о.	1.0	1.0	1.9	1.0	3.6	2.2	7	29	30	0.4
U	0.20	0.45	н.о.	0.20	0.40	0.40	0.3	0.3	0.6	11.6	3.5	0.3	0.40
Th	0.00	0.59	н.о.	0.17	0.42	0.30	н.о.	н.о.	н.о.	12	0.02	н.о.	0.04
Rb	0.40	0.14	н.о.	0.48	0.48	0.82	н.о.	н.о.	н.о.	0.5	7.3	н.о.	1.60
Zr	0.09	0.05	н.о.	0.02	0.07	0.04	н.о.	н.о.	н.о.	0.03	0.14	н.о.	0.04
Cs	0.00	н.о.	н.о.	0.01	0.15	0.07	н.о.	н.о.	н.о.	0.03	15	н.о.	0.01
Pb	0.05	н.о.	1.50	н.о.	0.01	0.01	1.00	1.00	1.00	н.о.	3.74	1.00	0.08
Cd	5.8	н.о.	<1	н.о.		26.0	0.1	0.1	5.57	0.50	0.02	7.85	0.1
Co	0.03	1.00	<1	<1	<1	0.05	1.00	1.00	1.00	1.00	0.02	1.00	0.15
Ni	0.48	1.00	<5	<1	<1	0.44	1.00	1.00	1.00	1.00	0.20	1.00	0.80
Cr	0.00	10	<50	<10	<10	10	1.00	1.00	1.00	10	0.56	1.00	0.7
ΣTR	0.06	4.30	н.о.	0.47	1.12	0.76	н.о.	н.о.	н.о.	3.79	0.04	н.о.	0.78

Примечание: н.о. – не определялся.

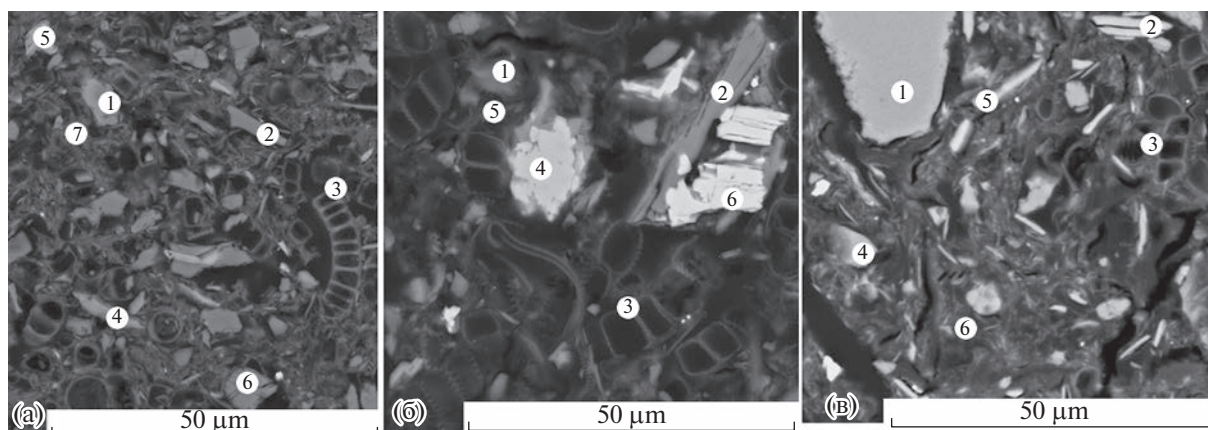


Рис. 3. Микрофотографии, выполненные с использованием СЭМ, донных отложений озер Теплый ключ (а), Зерлюколь-Нур (б) и М. Тархатинское (в).

(а) – зольность осадка 90% (1 – зерно кварца, 2 – пластинка мусковита, 3 – скелеты и обломки панцирей диатомовых, 4 – крупный агрегат хлорита ($Mg \geq Fe$), 5 – зерно альбита, 6 – зерно кпш, 7 – микрочешуйчатый агрегат иллита ($Mg \ll Fe$)); (б) – зольность осадка 56% (1 – зерно кварца, 2 – пластинка мусковита, 3 – скелеты и обломки панцирей диатомовых, 4 – крупный агрегат рутила, 5 – микрочешуйчатый агрегат иллита ($Mg \ll Fe$), 6 – крупные зерна титанита); (в) – зольность осадка 60% (1 – зерно кварца, 2 – пластинка мусковита, 3 – скелеты и обломки панцирей диатомовых, 4 – зерно альбита, 5 – чешуйчатый агрегат хлорита ($Mg \geq Fe$), 6 – микрочешуйчатый агрегат иллита ($Mg \ll Fe$)).

Fig. 3. Micrographs made using SEM, bottom sediments of lakes Teply Klyuch (a), Zerlyukol-Nur (б) and M. Tarkhatinskoe (в). (a) – ash sediment 90% (1 – quartz grain, 2 – muscovite plate, 3 – skeletons and fragments of diatom shells, 4 – large chlorite aggregate ($Mg \geq Fe$), 5 – albite grain, 6 – potassium feldspar grain, 7 – micro-scale illite aggregate ($Mg \ll Fe$)); (б) – 56% ash sediment (1 – quartz grain, 2 – muscovite plate, 3 – skeletons and fragments of diatom shells, 4 – large aggregate of rutile, 5 – micro-scale aggregate of illite ($Mg \ll Fe$), 6 – large grains of titanite); (в) – ash sediment 60% (1 – quartz grain, 2 – muscovite plate, 3 – skeletons and fragments of diatom shells, 4 – albite grain, 5 – chlorite scale aggregate ($Mg \geq Fe$), 6 – micro-scale illite aggregate ($Mg \ll Fe$)).

что и почвы мира или верхней континентальной коры (Ярошевский, 2004; Wedepohl, 1995).

Донные отложения. Донные отложения изученных озер представлены зеленовато-серыми органоминеральными илами, алевропелитовой размерности, с гомогенизированной массивной или орехово-скорлуповатой текстурой, за исключением донных отложений озер Каровое и Калгутинское, в составе которых больше половины осадка сложены крупной галькой и песком, состоящих из обломков гранитов. Основными компонентами донных осадков озер являются минералы терригенной фракции, многочисленные диатомовые водоросли и иногда аутигенные минералы (оз. Аргамджи). Зольность донного осадка от озера к озеру сильно варьирует от 50 до 95% (табл. 1). В донных отложениях озер (Аргамджи, Красное, Б. и М. Тархатинское и Зерлюколь-Нур) с низкой зольностью на дифрактограммах наблюдается ярко выраженное большое гало с максимумом в области 20° (2θ CuK_α). Интенсивность гало коррелирует с концентрацией диатомовых створок (аморфного кремнезема). При детальном изучении текстурно-структурных особенностей осадка, морфологических особенностей минералов, химического состава на уровне отдельных зерен, сростков выявлен приблизительно одинаковый спектр минералов донного осадка разных озер.

Основные минералы обломочной фракции представлены слабо окатанными или остроугольными зернами, агрегатами зерен минералов: кварц, полевые шпаты (альбит, олигоклаз, микроклин), слюды (мусковит, биотит, иллиты), хлорит при разном соотношении содержаний данных минералов от озера к озеру (рис. 3). Среди крупных обломков пород резко преобладают граниты, в составе которых к перечисленным минералам добавляются роговая обманка, эпидот и акцессорные минералы – магнетит, рутил, апатит, титанит, ильменит, циркон и др.

Аутигенные агрегаты в донных отложениях всех озер сформированы из аморфного кремнезема диатомовых скелетов, фрамбоэдров и отдельных кристаллов пирита (рис. 4, (а, в)), что указывает на восстановительные условия осадкообразования. Донные отложения озера Аргамджи на 30% представлены конкрециями гипса радиально-лучистого строения с сильной кавернозностью, обусловленной футлярным строением пластинок (рис. 4, (б)). Аналогичные конкреции гипса встречаются в донных отложениях оз. М. Тархатинское, но в значительно меньшем количестве и меньших размеров (рис. 4, (в)). В центральной части конкреций – пустота, заполненная иногда зернами кальцита, иногда створки диатомей в срастании с мелкими кристалликами пирита или тонкоче-

Таблица 3. Химический состав компонентов озерных систем в сопоставлении с литературными данными
Table 3. Chemical composition of components of lake systems in comparison with the literature data

Компо- ненты	Химический состав											
	Na	Mg	Al	K	Ca	Fe	Mn	Sr	Ba	Li	Be	V
	г/т											
Оз. Б. Тархатинское												
ДО	0.9 ± 0.2	1.3 ± 0.2	7.2 ± 1.3	2.1 ± 0.7	1.8 ± 0.4	2.9 ± 0.9	647 ± 249	150 ± 45	680 ± 135	36 ± 7	2.6 ± 0.8	99 ± 28
По	1.3 ± 0.3	1.4 ± 0.7	6.2 ± 1.8	1.8 ± 0.4	0.9 ± 0.4	3.8 ± 0.7	950 ± 285	87 ± 26	380 ± 89	32 ± 8	1.4 ± 0.4	89 ± 21
Пе	1.3	1.4	6.4	1.8	0.5	3.7	810	88	310	35	1.4	72
ПС	1.0 ± 0.0	1.1 ± 0.0	6.0 ± 0.2	1.6 ± 0.0	0.7 ± 0.2	3.8 ± 0.48	1400 ± 319	93 ± 23	390 ± 72	31 ± 12	1.4 ± 0.5	88 ± 27
Оз. М. Тархатинское												
ДО	0.4 ± 0.0	0.9 ± 0.2	5.7 ± 0.4	2.0 ± 0.5	0.2 ± 0.0	2.3 ± 0.8	242 ± 98	126 ± 88	603 ± 145	24 ± 8	2.6 ± 0.7	72 ± 13
По	0.4 ± 0.0	0.5 ± 0.2	5.2 ± 1.0	1.8 ± 0.3	0.1 ± 0.2	2.2 ± 0.9	234 ± 67	111 ± 61	457 ± 153	21 ± 9	2.5 ± 0.4	67 ± 30
Пе	0.2	0.2	5.5	1.9	0.1	1.8	199	78	478	19	2.3	59
ПС	1.4 ± 0.0	0.4 ± 0.0	5.1 ± 0.2	1.8 ± 0.2	0.2 ± 0.3	1.7 ± 0.26	278 ± 126	64 ± 12	365 ± 117	15 ± 6	2.1 ± 0.5	59 ± 31
Оз. Зерлоколь-Нур												
ДО	0.7 ± 0.2	1.3 ± 0.3	6.8 ± 1.6	1.8 ± 0.4	0.7 ± 0.1	3 ± 0.6	732 ± 216	65 ± 4	658 ± 412	22 ± 5	1.2 ± 0.3	91 ± 25
По	1.1	1.5	7	1.8	0.8	4.2	790	78	390	25	1.4	97
ПС	1.3	1.6	7.2	1.8	0.3	4.1	780	60	350	28	1.1	120
ВБ	0.5	0.5 ± 0.2	1 ± 1.08	1.2 ± 0.6	1.7 ± 0.5	1.1 ± 1.1	3928 ± 423	66 ± 18	58 ± 19	3 ± 3.3	0.3 ± 0.3	21 ± 18
Оз. Красное												
ДО	0.7 ± 0.1	0.8 ± 0.1	6 ± 0.7	1.6 ± 0.1	0.6 ± 0.1	2.7 ± 0.3	320 ± 20	52 ± 4	410 ± 29	51 ± 1	5 ± 0.3	74 ± 16
По	1.3 ± 0.3	0.5 ± 0.2	6.4 ± 1.1	3.3 ± 0.8	0.3 ± 0.1	1.9 ± 0.55	275 ± 97	57 ± 6	370 ± 99	27 ± 8	2.3 ± 0.4	37 ± 11
ПС	0.2	3.3	7.1	2.3	0.18	3.8	220	29	450	30	1	99
ВБ	0.1	0.05	0.05	0.002	0.27	0.2	110	10	38	0.4	0.011	< 1
Оз. Теплый ключ												
ДО	1.5 ± 0.3	0.6 ± 0.2	6.3 ± 0.6	2.6 ± 1.0	0.8 ± 0.3	2.2 ± 0.76	487 ± 343	74 ± 14	307 ± 96	145 ± 17	13 ± 2.8	59 ± 18
По	1.4 ± 0.3	0.6 ± 0.2	6 ± 1.05	2.8 ± 0.6	0.5 ± 0.2	2.2 ± 0.9	568 ± 237	71 ± 6	333 ± 75	89 ± 28	7.5 ± 3.4	57 ± 21
Пе	1.9	0.1	4.5	3	0.4	0.8	280	65	130	67	7.3	10
ПС	2.4 ± 0.0	0.3 ± 0.0	5.8 ± 0.2	3.8 ± 0.2	0.4 ± 0.3	1.3 ± 0.28	420 ± 113	62 ± 9	265 ± 7	111 ± 42	12.8 ± 4.5	36 ± 12
ВБ	0.5	0.3	2.6	0.6	0.8	3.4	7500	44	150	52	9.6	33

Таблица 3. Продолжение

Оз. Каровое													
ДО	2.4 ± 0.1	0.2 ± 0.0	5.7 ± 0.4	3.8 ± 0.3	0.4 ± 0.0	0.9 ± 0.1	336 ± 22	43 ± 10	179 ± 35	106 ± 6	12.6 ± 2	16 ± 5	
По	1.7 ± 0.3	0.5 ± 0.1	6.2 ± 2.3	2.8 ± 0.3	0.5 ± 0.1	1.7 ± 0.2	831 ± 600	53 ± 12	189 ± 75	111 ± 33	11.3 ± 3.7	46 ± 12	
Пе	3.3 ± 0.2	0.1 ± 0.0	5.9 ± 0.4	2.6 ± 0.7	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.2	329 ± 353	7 ± 7	19 ± 14	65 ± 64	34 ± 29.6	21	
ПС	2.5 ± 0.2	0.1 ± 0.0	3.9 ± 2.0	3.5 ± 0.0	0.3 ± 0.1	0.8 ± 0.0	431 ± 78	29 ± 6	64 ± 23	128 ± 12	9.5 ± 5	13 ± 4	
Оз. Калугинское													
ДО	1.9 ± 0.1	0.5 ± 0.0	6.2 ± 0.4	3.1 ± 0.2	0.6 ± 0.1	1.7 ± 0.08	254 ± 23	67 ± 25	369 ± 178	102 ± 8	8.2 ± 0.9	57 ± 7	
По	1.5 ± 0.4	0.5 ± 0.3	6.1 ± 1.1	2.8 ± 1.0	0.5 ± 0.2	2.0 ± 1.0	550 ± 272	75 ± 10	323 ± 78	86 ± 16	8 ± 3	46 ± 25	
Пе	2.4	0.1	4.9	4.9	0.4	0.8	228	77	389	66	5.5	18	
ПС	2.2 ± 0.1	0.3 ± 0.1	5.6 ± 0.6	3.8 ± 0.1	0.7 ± 0.1	1.6 ± 0.3	490 ± 37	73 ± 16	324 ± 146	113 ± 24	6.6 ± 2.8	26 ± 9	
Оз. Аргамджи													
ДО	0.5 ± 0.2	0.6 ± 0.1	4.9 ± 1.4	1.2 ± 0.3	1.3 ± 0.2	2.8 ± 0.6	160 ± 33	66 ± 6	49 ± 25	34 ± 11	2.8 ± 1.6	61 ± 26	
По	1.2 ± 0.1	0.5 ± 0.1	5.1 ± 1.3	2.4 ± 0.5	0.4 ± 0.1	2.1 ± 0.4	720 ± 133	65 ± 6	350 ± 125	23 ± 9	2.0 ± 0.6	37 ± 11	
Пе	1.5	0.3	4.8	0.5	0.3	1.4	180	62	320	24	3.1	20	
ПС	1.3 ± 0.1	0.4 ± 0.1	5.1 ± 1.3	2.5 ± 0.6	0.3 ± 0.1	1.9 ± 0.32	270 ± 52	58 ± 4	300 ± 79	24 ± 9	2.5 ± 0.9	32 ± 10	
ВБ	0.7	0.2	1.6	0.7	1.7	1.4	294	104	81	9.3	1	16	
ГКМ	2.7	0.3	6.3	3.3	0.4	0.8	470	32	85	890	38.8	19	
ВКК*	2.6	1.3	7.7	2.8	3	3.1	527	316	668	22	3	53	
ПК**	0.6	0.6	7.1	1.4	1.4	3.8	500	220	500	30	1.5	90	
ПУ***	1.1	1.3	3.5	2.0	0.8	2.8	650					69	
Компо- ненты	Химический состав												
	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Sb	Hg	Pb	Th	U	Mo	
	г/г												
Оз. Б. Тархатинское													
ДО	123 ± 47	18 ± 5	75 ± 27	107 ± 60	62 ± 19	0.14 ± 0.08	3.6 ± 0.2	0.02 ± 0.02	12 ± 7	7.9 ± 2.1	5.5 ± 2.1	3.2 ± 0.3	
По	110 ± 29	17 ± 9	70 ± 36	25 ± 6	48 ± 10	0.10 ± 0.04	4.6 ± 0.4	0.02 ± 0.02	7 ± 2	4.9 ± 1.1	2.2 ± 0.7	0.2 ± 0.0	
Пе	100	16	65	6	33	0.02	3.6	0.01	2.6	4.2	1.6	0.1	
ПС	90 ± 12	16 ± 9	54 ± 21	27 ± 6	54 ± 17	0.01 ± 0.00	4.2 ± 0.5	0.01 ± 0.00	8 ± 2	8.5 ± 3.1	5.2 ± 2.3	5 ± 1.0	

Таблица 3. Продолжение

Оз. М. Тархагинское												
ДО	89 ± 33	13 ± 3	55 ± 21	233 ± 87	67 ± 23	0.34 ± 0.8	23 ± 6	0.02 ± 0.01	28 ± 9	10 ± 2.9	5.5 ± 3.1	3 ± 3
По	90 ± 28	11 ± 9	56 ± 23	67 ± 34	68 ± 18	0.17 ± 0.4	9.6 ± 3.5	0.02 ± 0.02	17 ± 7	9 ± 3.1	5.2 ± 1.9	2.2 ± 1
Пе	100	10	44	61	63	0.02	5.6	0.01	16	8.2	4.6	2.1
ПС	90 ± 19	11 ± 5	54 ± 17	57 ± 26	64 ± 33	0.01 ± 0.00	4.2 ± 3.5	0.01 ± 0.00	18 ± 8	8.5 ± 3.5	5.2 ± 3.3	2 ± 1.9
Оз. Зерлоколь-Нур												
ДО	150 ± 31	16. ± 3	7 ± 11	70 ± 6	76 ± 10	0.11 ± 0.02	3.6 ± 0.4	0.05 ± 0.02	12 ± 7	7.1 ± 1.1	4.9 ± 2	5.2 ± 0.43
По	120	17	82	26	63	0.05	3.8	0.04	7	5.8	2.2	2.7
ПС	130	17	77	23	57	0.03	3.9	0.02	10	6.3	2.1	1.1
ВБ	19 ± 21	4 ± 2.4	22 ± 11	14 ± 9	32 ± 4	0.10 ± 0.07	0.6 ± 0.3	0.04 ± 0.02	15 ± 9	2.6 ± 3.1	7 ± 5.3	2.1 ± 1.3
Оз. Красное												
ДО	82 ± 9	14 ± 2	57 ± 1	59 ± 20	93 ± 4	0.22 ± 0.03	1.9 ± 0.4	0.06 ± 0.01	12 ± 1	14 ± 2.2	11 ± 4	16 ± 6
По	25 ± 6	6.6 ± 1	12 ± 2	17 ± 4	13 ± 4	0.02 ± 0.00	3.1 ± 1.5	0.03 ± 0.01	4 ± 1	8 ± 0.4	4.6 ± 1.8	4.4 ± 1.5
ПС	120	14	64	3	40	0.003	6.5	0.01	2	8.3	2.4	1.4
ВБ	2	0.5	2	7	31	0.03	0.04	0.003	1	0.9	0.8	1.2
Оз. Теплый ключ												
ДО	61 ± 14	10 ± 4	31 ± 16	66 ± 37	75 ± 26	0.42 ± 0.3	1.4 ± 0.2	0.03 ± 0.01	24 ± 6	30.6 ± 6.7	14 ± 3.6	2.5 ± 0
По	52 ± 12	6.6 ± 3	19 ± 8	24 ± 10	57 ± 19	0.12 ± 0.11	1 ± 0.3	0.02 ± 0.01	19 ± 5	14.3 ± 2.5	7.4 ± 2.6	2.4 ± 0.53
Пе	13	1.8	4	8	15	0.01	0.9	0.02	12	14	5.1	1.2
ПС	25 ± 6	2.6 ± 1	8 ± 0.1	18 ± 4	26 ± 4	0.32 ± 0.42	0.8 ± 0.5	0.00 ± 0.00	12 ± 3	20 ± 0.04	7.8 ± 1.5	4.1
ВБ	24	20	15	38	65	0.77	0.5	0.07	16	35	12.3	2.1
Оз. Каровое												
ДО	36 ± 9	2. ± 0.6	9 ± 1	29 ± 6	22 ± 4	0.14 ± 0.01	0.8 ± 0.2	0.001 ± 0.001	7 ± 1	8.6 ± 0.9	10.2 ± 1.6	11 ± 0.86
По	45 ± 5	5. ± 1.4	15 ± 4	46 ± 44	42 ± 15	0.25 ± 0.25	1.3 ± 0.6	0.01 ± 0.01	10 ± 4	10 ± 2	9.9 ± 6.4	9.8 ± 2.74
Пе	29 ± 17		8 ± 2	6 ± 1	12 ± 6	0.02 ± 0.001	0.6 ± 0.1	0.001 ± 0.001	7 ± 0.1	0.8 ± 0.3	12 ± 2	2.3
ПС	22 ± 1	2. ± 0.4	4 ± 3	10 ± 3	17 ± 4	0.06 ± 0.02	0.5 ± 0.2	0.01 ± 0.001	3 ± 1	9.3 ± 0.03	12.7 ± 3.8	13.2
Оз. Калугинское												
ДО	43 ± 7	5 ± 0.4	18 ± 1	20 ± 2	33 ± 5	0.08 ± 0.01	1 ± 0.3	0.001 ± 0.001	11 ± 1	13.1 ± 0.5	6 ± 0.5	2.2 ± 0.26
По	48 ± 17	6. ± 4.1	19 ± 12	21 ± 13	61 ± 46	0.23 ± 0.37	1.1 ± 0.3	0.01 ± 0.01	16 ± 4	16.3 ± 5.3	6 ± 2	5.9 ± 1.12

Таблица 3. Окончание

Оз. Аргамджи												
Пе	14	1.8	3	6	12	0.06	1	0.01	10	11.2	8.8	2.9
ПС	27 ± 2	2. ± 2.1	8 ± 1	15 ± 1	30 ± 4	0.03 ± 0.01	0.8 ± 0.02	0.01 ± 0.001	12 ± 3	17.9 ± 0.001	4.5 ± 3.6	1.2 ± 0.07
ДО	66 ± 15	8. ± 1.6	39 ± 7	45 ± 21	54 ± 18	0.13 ± 0.02	3.1 ± 0.3	0.05 ± 0.01	7 ± 1	11.8 ± 2	106 ± 34	46 ± 20
	45 ± 14	15 ± 4.9	9 ± 2	14 ± 5	18 ± 6	0.15 ± 0.07	3.1 ± 0.8	0.02 ± 0.01	7 ± 4	6.3 ± 2.3	3.5 ± 1.2	0.9 ± 0.1
	25	4	10	5	12	0.03	3.0	0.00	6	7.0	2.9	0.5
	27 ± 7	7 ± 3.1	14 ± 7	10 ± 3	3 ± 0.0	0.02 ± 0.00	2.7 ± 0.8	0.01 ± 0.00	5 ± 1	7.3 ± 2.3	1.8 ± 0.2	0.9 ± 0.02
	83	2.2	11	18	24	0.15	2.6	0.02	5	5	1.6	25
ГКМ	29	2.8	6	38	35	0.05	1.1	0.01	7	4.5	12.2	13.9
ВКК*	35	11.6	19	14	52	0.1	0.3	0.06	17	10.3	2.5	2.8
ПК**	60	9	20	23	60	0.16	0.9	0.1	20	6.5	1.5	2.0
ПУ***	62	12	42	28	51				12			2.3

Примечание: среднее арифметическое ± стандартное отклонение; ДО — донные отложения; По — почвы; Пе — песок; ПС — почвенный субстрат; ВБ — водная биота; ГКМ — граниты Калгутинского массива; ВКК* — верхняя континентальная кора по (Wederohl, 1995); ПК** — почвы континентов по (Ярошевский, 1990); ПУ*** — почвы Укока по (Пузанов и др., 2020).

шуйчатого иллита. В донных отложениях оз. Зерлюколь-Нур и Б. Тархатинское присутствуют мелкие зерна и их срастания кальцита (рис. 4, (г)). Зерна кальцита имеют ромбоидальную форму с расщепленными или зазубренными краями размерами от 1 до 5 мкм. В донном осадке озер Красное, М. Тархатинское отмечаются отдельные удлиненные зерна и друзы барита (рис. 4, (д)). В донных отложениях всех изученных озер состав тонкошуйчатого иллита (размер около 1 до 2 мкм) (рис. 4, (е)) отличается от состава крупношуйчатых агрегатов хлорита, слюд (от 3 до 15 мкм) значительным преобладанием железа над магнием (соотношение Fe—Mg колеблется от величины 4—1 до 7—1) в его структуре (рис. 5).

В отличие от других компонентов озерной системы донные отложения всех изученных озер характеризуются повышенными содержаниями Be, Cu, озера Калгутинского массива Cd, K, Zn, а Тархатинской долины — Sb. В донных отложениях озер Аргамджи, Красное, Каровое, находящихся в поймах рек Аргамджи или Жумалы, источники которых расположены в W-Мо или Мо штоков, отмечаются повышенные концентрации Мо.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Повышенное содержание серы и натриевый состав термальных вод объясняются развитием гипергенного окисления и геохимической спецификой гранитов, дренируемых теплыми водами глубинного формирования (Федак и др., 2011; Паничев и др., 2022). Так как в почвообразующем субстрате на всей исследуемой территории резко преобладают полевые шпаты K-Na состава и много сульфидов, то при их дренировании воды некоторых озер приобретают содовый состав с повышенным содержанием сульфат-иона. Изменения ионного состава и значений концентрации большей части изученных микроэлементов в озерных водах, в целом, соответствуют процессам взаимодействия метеорной воды с почвами и горными породами водосборных территорий. Увеличение в ионном составе воды Na, S и ряда микроэлементов (Li, U, Th и др.) скорее всего связано с поступлением в озера Аргамджи, Красное, Теплый ключ подземных термальных вод, присутствующих на данной территории, так как именно термальные источники “Джумалинские теплые ключи” обогащены этим же набором элементов (рис. 2, табл. 2). В составе донных отложений исследуемых озер в основном доминируют минералы обломочного материала при разных соотношениях с аутигенными минералами (кальцит, гипс, пирит, иллит) и мортмассой растительных остатков (табл. 1). Основными минералами обломочного материала являются полевые шпаты, кварц, мусковит, хлорит, акцессорные (рутил, титанит, апатит, циркон, магнетит, ильменит) и их

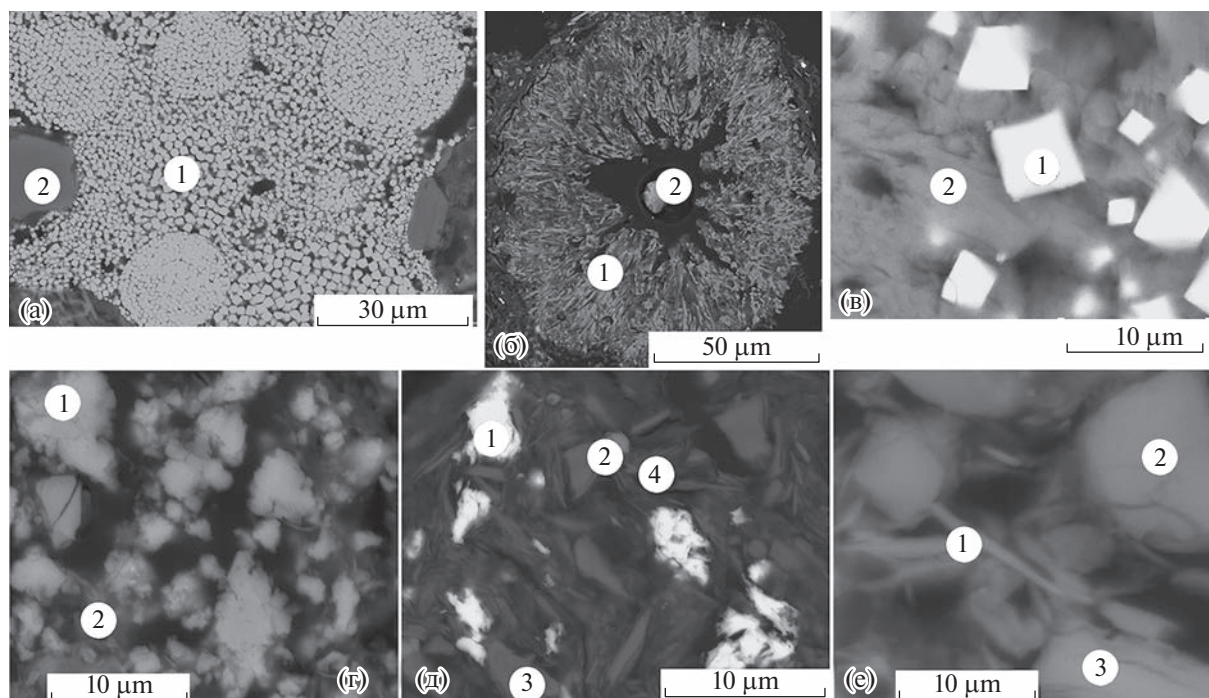


Рис. 4. Микрофотографии, выполненные с использованием СЭМ, аутигенных образований донных отложений озер Красное (а), Аргамджи (б), М. Тархатинское (в), Зерлюколь-Нур (г), Красное (д) и Теплый ключ (е).

(а) – 1 – фрамбуэдри и кристаллики пирита, 2 – зерно кварца; (б) – 1 – конкреция гипса радиально-лучистого строения с центром, 2 – представленным кристаллом кальцита; (в) – 1 – футлярные мелкие кристаллы гипса с 2 – кристаллами пирита; (г) – 1 – зерна кальцита ромбоидальной формы с расщепленными краями, 2 – микрочешуйчатый агрегат иллита ($Mg \ll Fe$); (д) – 1 – удлиненные зерна и их агрегаты барита, 2 – зерно кварца, 3 – пластинка мусковита, 4 – микрочешуйчатый агрегат иллита ($Mg \ll Fe$); (е) – 1 – микрочешуйчатый агрегат иллита ($Mg \ll Fe$), 2 – зерно кварца, 3 – таблитчатый кристалл КППШ.

Fig. 4. Micrographs made using SEM, authigenic formations of bottom sediments of lakes Krasnoe (a), Argamjji (b), M. Tarkhatinskoe (v), Zerlukol-Nur (r), Krasnoe (d) and Teply kluch (e).

(a) – 1 – framboida and crystals of pyrite, 2 – quartz grain; (b) – 1 – concretion of gypsum of radially radiant structure with a center, 2 – represented by a calcite crystal; (v) – 1 – case small gypsum crystals with 2 – pyrite crystals; (r) – 1 – rhomboidal calcite grains with split edges, 2 – micro-scale illite aggregate ($Mg \ll Fe$); (d) – 1 – elongated grains and their aggregates of barite, 2 – quartz grain, 3 – muscovite plate, 4 – micro-scale illite aggregate ($Mg \ll Fe$); (e) – 1 – micro-scale illite aggregate ($Mg \ll Fe$), 2 – quartz grain, 3 – tabular crystal potassium feldspar.

состав отвечает составу минералов горных пород площадей водосбора. Важным фактором проявления криогенного воздействия на горные породы является в основном усредненный гранулометрического состава минералов (алевритопелитовая размерность, слабо окатанная морфология зерен). Согласно данным Е.Ю. Зарубиной, Н.И. Ермолаевой и Г.В. Феттер все исследованные озера относятся к олиготрофным и продукционные процессы в озерах проходят интенсивнее деструкционных (Зарубина, Феттер, 2022 и др.) и поэтому в озерах Аргамджи, Теплый ключ, М. и Б. Тархатинское накапливается мортмасса растительных остатков. При образовании льда в озере происходит увеличение минерализации в подледной воде, особенно в мелководных озерах (до 2.5 м глубиной – Аргамджи, Красное, М. Тархатинское) и кристаллизацией аутигенных минералов из захваченной льдом части растворенных солей, а в основном из отжатой, остаточной воды, в резуль-

тате чего образуются кальцит, конкреции гипса, иногда даже кристаллики галита (рис. 4). При таянии льда значительная часть новообразованных карбонатов и сульфатов вместе с минералами обломочной фракции захораниваются в осадок, а с минерализацией вод происходит ее криогенное опреснение. При криогенезе формирование аутигенных минералов разного состава при промерзании зависит от исходного химического состава вод, глубины озера и высоты расположения котловины озера над уровнем моря (чем выше находится котловина, тем выше скорости изменения абсолютных значений температур). Сопоставление минеральных ассоциаций в кернах донных отложений озер показало, что минералы терригенной фракции имеют аналогичный состав, размерность, морфологию. Донные отложения озер друг от друга отличаются различным количеством мортмассы растительных остатков и разным набором аутигенных минералов. Именно



Рис 5. Диаграмма слюд в координатах Mg–Al–Fe с вынесенными составами слоистых алюмосиликатов донных отложений озер (ромб – мусковит, круг – иллит, ромб – хлорит) и составом биотитов (черный квадрат) и мусковит (серый ромб) Калгутинской рудно-магматической системы, Горный Алтай (Mo, W) по литературным данным (Анникова и др., 2004; Поцелуев и др., 2006; Соколова и др., 2011).

Fig. 5. Diagram of micas in Mg–Al–Fe coordinates with the compositions of layered aluminosilicates of bottom sediments of lakes (rhombus – muscovite, circle – illite, rhombus – chlorite) and the composition of biotites (black square) and muscovite (gray rhombus) of the Kalgutinsky ore-magmatic system, Gorny Altai (Mo, W) according to literature data (Annikova et al., 2004; Kissing et al., 2006; Sokolova et al., 2011).

совокупность всех трех факторов: гидрокарбонатно-натриевый состав воды с повышенным содержанием сульфат-иона, небольшая глубина (до 2 м) и высота расположения котловины (2400 м над у. м.) обусловили значительное преобладание гипса при наличии только одиночных зерен кальцита, расположенных в центре гипсовых конкреций в оз. Аргамджи (до 30% осадка сложено гипсом). В озерах М. Тархатинское и Красное, где величины валовой первичной продукции фитопланктона максимальны, выявлены значительные количества фрамбозального пирита (до 7% от общей массы илов) (рис. 4, (а)). Образование зерен кальцита в озерах Зерлюколь-Нур и Б. Тархатинское связано с их гидрокарбонатно-кальциевым составом вод при практически отсутствии сульфат ионов, небольшой глубиной (в оз. Б. Тархатинское, согласно данным эхолота, большая часть акватории мелководье) и высотой расположения котловин (2300 м над у. м.). Состав тонкошелушчатых агрегатов иллита в озерах изменяется в одних и тех же пределах и, как видно из диаграммы катионного состава (рис. 5), иллит образуется при деградации пластинчатых зерен мусковита, разрушение которых, по-видимому,

происходит в результате криогидратационного механизма выветривания. Многократное замерзание и оттаивание горных пород сопровождаются постепенным нарастанием расширяющихся микротрещин, в которые поступают новые порции воды, очередное замерзание которой сопровождается разрывом кристаллохимических связей, выносом калия, дроблением кристаллов и увеличением сорбционной поверхности. Поступая в озера, деградированные зерна слоистых минералов, согласно информации, приведенной в монографии В.А. Конищева в период промерзания водоема, совместно с аморфными агрегатами железа могут агрегировать, что и приводит к образованию железистых разновидностей иллита (Конищев, 2006).

В работе А.В. Пузанова и соавт. (2020) показано, что исходная неоднородность моренных и озерно-ледниковых отложений определяет разнообразие распределения элементов в почвах и их содержания в почвах плоскогорья Укок соответствуют их концентрациям в горно-тундровых почвах Алтая. Исключением являются почвы и почвообразующие породы, сформированные над Калгутинским рудным узлом (Пузанов и др., 2020). В объяснительной записке к геологической карте также указано, что при криогенном механогенезе в почвах и донных осадках накапливаются Be, Ag, P, Co, Sc, Zn, Li, Cu, Nb, а местная миграция направлена в сторону обогащения донных осадков Cu, Mo (Федак и др., 2011). Полученные нами данные по конкретным почвенным разрезам с водосборной площади отдельно взятого озера отличаются от озера к озеру, но изменяются в пределах дисперсии, указанной А.В. Пузановым для всех почв плоскогорья Укок (табл. 3), а выделенные нами ассоциации элементов обогащения или обеднения почв и донных осадков изученных озер сопоставимы с приведенным набором элементов в объяснительной записке. Слабая изученность химического состава поверхностных вод озер, и особенно донных отложений плоскогорья Укок, определяет проведения сравнительного анализа только с хорошо изученными горными породами водосборных площадей озер. Сопоставление геохимического состава донных отложений изученных озер с геохимическим составом верхней континентальной коры и горных пород Калгутинского массива (Анникова и др., 2004; Поцелуев и др., 2006; Соколова и др., 2011) показало, что они также, как и остальные компоненты озерных систем, обеднены Ca, Sr, Ba, Pb, Hg и, кроме этих элементов Na, и обогащены Li, Sb, U (табл. 3). При этом вариации значений обеднения и обогащения имеют тот же порядок величин, что и для горных пород Калгутинского массива. Повышенные содержания Be, Cu во всех донных отложениях, а также Cd, K, Zn в озерах Калгутинской впадины, возможно, связаны с вы-

сокими концентрациями этих элементов в водах озер, которые обогащаются ими за счет дренирования обломков пород рудных дайковых комплексов в моренных отложениях. Высокие абс. значения Мо в водах р. Жумалы и источника “Джумалинские теплые ключи” связаны с дренированием водами рыхлых моренных отложений мощностью до нескольких метров, представленными обломками гранитов Аргамджинского и Молибденового штоков, расположенных на территории верховий р. Жумалы. Донные отложения озер Аргамджи, Красное, Каровое, находящихся в поймах рек Аргамджи или Жумалы, также характеризуются повышенными концентрациями Мо, что скорее всего объясняется сорбцией молибдена из воды слоистыми силикатами, так как акцессорных минералов Мо (молибденита, повеллита и др.) не найдено. Известно, что на производстве холодный 1%-й раствор соды используют для десорбции молибдена при переработке молибденовых концентратов. Следовательно, в содовых водах происходит накопление молибдена, а дальше в процессе криогенеза возможна его сорбция минералами с высокой сорбционной поверхностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно полученным данным, донные отложения изученных озер характеризуются разными соотношениями минерального обломочного материала, мортмассой растительных остатков и аутигенных минералов (кальцит, гипс, пирит, иллит). В целом состав обломочной фракции донных отложений озер сходен и наследует геохимический и минеральный составы терригенного материала, поступающего в водоем со снеготалыми и дождевыми потоками, ледовым и золовым переносом с водосборных территорий в условиях господства криогенных процессов. В донных отложениях озер, расположенных в пределах одной котловины (Бертекской или Тархатинской), абсолютные концентрации элементов (макро- (Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, Ti, P) и микро- (Cd, Pb, Cu, Zn, Mn, Cr, Ni, Co, V, Hg, Ba, Sr, Th, Rb, Cs, Hf, Ta, TR+Y) отличаются в пределах одного стандартного отклонения, за исключением значительных вариаций содержаний отдельных элементов (Mo, U, Li, Be). Повышенные концентрации Mo, U, Li, Be в донных отложениях озер (Аргамджи, Теплый ключ, Калгутинское, Каровое) связаны с присутствием рудных концентраций этих элементов на локальных водосборных территориях отдельно взятого озера (Li, Be — оз. Теплый ключ, Калгутинское; Mo, U, Li, Be — оз. Аргамджи, Каровое).

Минеральные ассоциации донных отложений изученных озер отличаются друг от друга составом аутигенных минералов и от горных пород, почв водосборных площадей составом слоистых

силикатов. В составе тонкочешуйчатых, спутанно-волокнуистых агрегатов иллита донных отложений озер, количество железа в 2–4 раза больше, чем в составе пластинчатых агрегатов слюд, хлоритов из горных пород, почв водосборных площадей. В условиях нивального седиментогенеза часть агрегатов слюд привносятся в воды озер в деградированном состоянии. В конечном водоеме стока в период его промерзания данные зерна совместно с аморфными агрегатами железа могут агрегировать, что и приводит к образованию железистых разновидностей иллита.

В условиях, когда ведущий геохимический процесс преобразования горных пород, почв, грунтов — криогенез, ассоциация аутигенных минералов зависит от исходного химического состава вод, глубины водного столба и высоты расположения котловины озера над уровнем моря (чем выше находится котловина и мелководней озеро, тем выше скорости изменения абсолютных значений температур образования и толщины льда), количества мортмассы растительных остатков (анаэробные условия). Интегрированная совокупность данных факторов определила возможность кристаллизации гипсовых конкреций в озерах Аргамджи, М. Тархатинское и кальцитовых агрегатов в озерах Зерлюколь-Нур и Б. Тархатинское при пресном составе вод.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00111, <https://rscf.ru/project/23-27-00111/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алифанов В.М., Гугалинская Л.А. (2005). Палеогидроморфизм, палеокриогенез и морфолитопедогенез черноземов // Почвоведение. № 3. С. 309–315.
- Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике. (2017) / Под. ред. П.А. Лозовик, Н.А. Ефременко. СПб.: Нестор-История. 272 с.
- Андрейчук В.Н., Кадебская О.И., Чайковский И.И. (2013). Криогенные минеральные образования Кунгурской Ледяной пещеры. Сосновец-Пермь: Силезский университет. 128 с.
- Анникова И.Ю., Владимиров А.Г., Выставной С.А. и др. (2004). Геолого-геофизическая модель формирования Калгутинской рудно-магматической системы (Южный Алтай) // Известия ТПУ. Т. 307. № 4. С. 38–42.
- Бородавко П.С. (2009). Четвертичная эволюция озерных систем Алтайской горной страны // Журнал СВУ. Сер.: Биология. Т. 2. № 1. С. 18–29.
- Величко А.А., Морозова Т.Д., Нечаев В.П. и др. (1996). Палеокриогенез, почвенный покров и земледелие. М.: Наука. 150 с.

- Ганюшкин Д.А., Чистяков К.В., Волков И.В. и др. (2017). Новейшие данные об оледенении северного склона массива Таван-Богдо-Ола (Алтай) // Лед и Снег. Т. 57. № 3. С. 307–325.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-307-325>
- Геологическая карта: М-45-XXII, XXVIII. Геологическая карта СССР. Серия Горно-Алтайская м-ба 1:200000. (1959) / Под ред. П.А. Ренгартена. М.: Госгеолтехиздат. 1 л.
- Геологическая карта: М-45-XXIII, XXIX. Геологическая карта Российской Федерации. Издание второе. Серия Горно-Алтайская м-ба 1:200 000. (2009) / Под ред. С.С. Долгушина. М.: Роснедра. 1 л.
- ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб. (2013). М.: Стандартинформ. 31 с.
- Ельчинова О.А., Пузанов А.В., Рождественская Т.А. (2019). Физико-химические свойства и содержание биогенных элементов в горно-тундровых почвах Горного Алтая // Известия АО РГО. Т. 55. № 4. С. 106–111.
<https://doi.org/10.24411/2410-1192-2019-15512>
- Зарубина Е.Ю., Феттер Г.В. (2022). Особенности образования первичной продукции и деструкции органического вещества в горных озерах Русского Алтая // Мат-лы IV Всерос. науч. конф. с междунар. участием “Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии”, 29 августа – 3 сентября 2022 г. Т. 2. Барнаул: Пять плюс. С. 236–241.
- Иванов А.В. (1998). Криогенная метаморфизация химического состава природных льдов, замерзающих и талых вод. Хабаровск: Дальнаука. 164 с.
- Карта четвертичных отложений: М-45-XXIII, XXIX. Геологическая карта Российской Федерации. Изд. второе. Карта четвертичных образований. Серия Горно-Алтайская м-ба 1:200000. (2009) / Под ред. С.С. Долгушина. М.: Роснедра. 1 л.
- Криолитогенез. Признаки и призраки криолитосферы. (2021) / Под ред. Ю.Б. Баду. М.: Изд-во Моск. ун-та. 367 с.
- Конищев В.Н. (1988). Соотношение криогенных и некриогенных факторов гипергенеза в области вечной мерзлоты // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. № 1. С. 8–14.
- Конищев В.Н., Лебедева-Верба М.П., Рогов В.В. и др. (2006). Криогенез современных и позднеледниковых отложений Алтая и перигляциальных областей Европы. М.: ГЕОС. 128 с.
- Маслов В.И., Козлов М.С., Довгаль В.Н. и др. (1994). Комплекс онгонитов и литийфтористых гранитов юго-западного Алтая // Петрология. Т. 2. № 3. С. 331–336.
- Михайлов Н.Н. (1994). Озера Алтая, их происхождение и история // География и природопользование Сибири. № 1. С. 75–89.
- Михайлов Н.Н. (1995). Алтай // История озер Севера Азии. СПб.: Наука. С. 249–262.
- Окишев П.А. (2011). Рельеф и оледенение Русского Алтая. Томск: Изд-во ТГУ. 382 с.
- Паничев А.М., Барановская Н.В., Вах Е.А. (2022). Новые данные по химическому составу вод Джумалинского геотермального источника, Горный Алтай, Россия // Полевые исследования в Алтайском биосферном заповеднике. № 4. С. 137–143.
https://doi.org/10.52245/26867109_2022_4_137
- Поцелуев А.А., Бабкин Д.И., Котегов В.И. (2006). Калгутинское комплексное месторождение (Горный Алтай): минералого-геохимическая характеристика, флюидный режим рудообразования // Геология рудных месторождений. Т. 48. № 5. С. 439–459.
- Пузанов А.В., Бабошкина С.В., Балыкин С.Н. и др. (2020). Содержание химических элементов в почвах и поверхностных водах плоскогорья Укок (Юго-Восточный Алтай) // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. Т. 331. № 1. С. 34–43.
<https://doi.org/10.18799/24131830/2020/1/2445>
- Романовский Н.Н. (1993). Основы криогенеза литосферы. М.: Изд-во Моск. ун-та. 334 с.
- Рудой А.Н. (1980). О генезисе и возрасте ленточных отложений долины Большого Улагана (Горный Алтай) // Вопросы географии Сибири. Вып. 13. Томск: Изд-во Томского ун-та. С. 88–91.
- Рудой А.Н., Лысенкова З.В., Рудский В.В. и др. (2000). Укок (прошлое, настоящее, будущее). Барнаул: Алтайский гос. ун-т. 174 с.
- Русанов Г.Г. (2015). Оптимум голоцена Юго-Восточного Алтая на примере отложений высокогорного Тархатинского озера // Известия АО РГО. № 1 (36). С. 81–85.
- Савенко А.В., Савенко В.С., Покровский О.С. (2020). Новые данные по содержанию растворенных микроэлементов в водах рек Российской Арктики // ДАН. Науки о Земле. Т. 491. № 2. С. 82–88.
<https://doi.org/10.31857/S2686739720040167>
- Севастьянов Д.В., Михайлов Н.Н. (1994). Озерные комплексы Горного Алтая и их эволюция в голоцене // Вестник СПбГУ. Сер. 7. Геология. География. № 3. С. 59–68.
- Селегей В.В., Селегей Т.В. (1978). Телецкое озеро. Л.: Гидрометеиздат. 142 с.
- Соколова Е.Н., Смирнов С.З., Астрелина Е.И. и др. (2011). Состав, флюидный режим и генезис онгонит-эльвановых магм Калгутинской рудно-магматической системы (Горный Алтай) // Геология и геофизика. Т. 52. № 11. С. 1748–1775.
- Федак С.И., Туркин Ю.А., Гусев А.И. и др. (2011). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист М-45 – Горно-Алтайск. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 567 с.
- Фотиев С.М. (2009). Криогенный метаморфизм пород и подземных вод (условия и результаты). Новосибирск: ГЕО. 279 с.
- Фотиев С.М. (2020). Дискуссионные проблемы геокриологии: обзор достижений // Криосфера Земли. Т. XXIV. № 3. С. 3–17.
[https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-3\(3-17\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-3(3-17))
- Ярошевский А.А. (2004). Проблемы современной геохимии: конспект лекций, прочитанный в ГЕОХИ РАН в зимнем семестре 2003–2004 гг. Новосибирск: НГУ. 194 с.
- Gerasimova M.I., Lebedeva I.I., Khitrov N.B. (2013). Indexation of soil horizons: state of the problem, problems and suggestions // Soil Science. No. 5. P. 627–638.
- Kalugin I., Daryin A., Smolyaninova L. et al. (2007). 800 year long annual records of air temperature and

precipitation over Southern Siberia inferred from high-resolution time-series of Teletskoye Lake sediments // Quat. Res. Vol. 67. Iss. 3. P. 400–410.
<https://doi.org/10.1016/j.yqres.2007.01.007>

Wedepohl K.H. (1995). The composition of the continental crust // Geochim. Cosmochim. Acta. Vol. 59. No. 7. P. 1217–1232.
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2)

MINERAL COMPOSITION AND FORMATION CONDITIONS OF BOTTOM SEDIMENTS OF THE SMALL LAKES IF THE UKOK PLATEAU (ALTAI)¹

V. D. Strahovenko^{a, #}, G. I. Malov^a, E. A. Ovdina^a, and V. I. Malov^a

^a*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia*

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

Numerous modern lakes appeared in the intermountain basins and on the high-elevation plateaus of Altai within the immediate distribution of glaciation in the Neo-Pleistocene. There is little known about the geochemical processes of autigenic mineral formation in lake systems under conditions of nival sedimentogenesis. The study of cores of bottom sediments of 8 high-altitude lakes of Altai showed that the waters of the lakes are fresh bicarbonate with variations in the cationic composition of Ca–Na. The bottom sediments of lakes are characterized by different ratios of mineral detrital material, autigenic minerals (calcite, gypsum, pyrite, illite) and mortmass of plant residues. In the bottom sediments of lakes located within the same basin (Bertek or Tarkhatinskaya), the absolute concentrations of elements differ within one standard deviation, with the exception of significant variations in the contents of individual elements (Mo, U, Li, Be). The enrichment of bottom sediments of lakes (Argamdzhi, Teply Klyuch, Krasnoe) with these elements is associated with the presence of ore concentrations (Mo, U, Li, Be) in the local catchment areas of a single lake. The mineral associations of the sediments of the studied lakes differ from each other in the composition of autigenic minerals, and from rocks, soils of catchment areas in the composition of layered silicates. In the composition of fine-scaled, tangled fibrous aggregates of the bottom sediment illite, the amount of iron is 2–4 times greater than in the composition of lamellar aggregates of micas, chlorites from rocks, soils of catchment areas. Cryogenic processes have determined the crystallization of gypsum nodules in the lakes Argamdzhi and Small Tarkhatinskoye; and calcite aggregates in Zerlyukol–Nur and Large Tarkhatinskoye in significant volumes for lakes with fresh water composition.

Keywords: nival sedimentogenesis, bottom sediments, small lakes, Altai Mountains, mineralogy, geochemistry

ACKNOWLEDGMENTS

The study was carried out at the expense of a grant Russian Science Foundation No. 23-27-00111, <https://rscf.ru/project/23-27-00111/>.

REFERENCES

- Alifanov V.M., Gugalinskaya L.A. (2005). Paleohydromorphism, paleocryogenesis, and morpholithopedogenesis of chernozems. *Eurasian Soil Sci.* Vol. 38. No. 3. P. 272–277.
- Andreychuk V.N., Kadebskaya O.I., Chaykovskii I.I. (2013). Kriogennyye mineral'nye obrazovaniya Kungurskoi Ledyanoi peshchery (Cryogenic mineral formations of the Kungur Ice Cave). *Sosnovets–Perm': Silezskii universitet* (Publ.). 128 p. (in Russ.)
- Annikova I.Yu., Vladimirov A.G., Vystavnoi S.A. et al. (2004). Geological and geophysical model of the formation of the Kalguta ore-magmatic system (Southern Altai). *Izvestiya TPU.* Vol. 307. No. 4. P. 38–42. (in Russ.)
- Badu Yu.B. (Ed.). (2021). Kriolitogenez. Priznaki i prizraki kriolitosfery (Cryolithogenesis. Signs and Ghosts of the Cryolithosphere). Moscow: Moscow University (Publ.). 368 p.
- Borodavko P.S. (2009). Quaternary evolution of the Altay Mountains lakes systems. *Zhurnal SFU. Ser.: Biologiya.* Iss. 1. No. 2. P. 18–29. (in Russ.)
- Dolgushin S.S. (Ed.). (2009). Geologicheskaya karta: M-45-XXIII, XXIX. Geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Izdanie vtoroe. Seriya Gorno-Altayskaya m-ba 1:200000 (Geological map: M-45-XXIII, XXIX. Geological map of the Russian Federation. Second edition. Gorno-Altai series, scale 1 200 000). Moscow: Rosnedra (Publ.). 1 p. (in Russ.)
- Dolgushin S.S. (Ed.). (2009). Karta chetvertichnykh otlozhenii: M-45-XXIII, XXIX. Geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Izdanie vtoroe. Karta chetvertichnykh obrazovaniy. Seriya Gorno-Altayskaya m-ba 1:200000 (Map of Quaternary deposits: M-45-XXIII, XXIX. Geological map of the Russian Federation. Second edition. Map of Quaternary deposits: M-45-XXIII, XXIX. Geological map of the Russian Federation. Second edition. Gorno-Altai series, scale 1 200 000). Moscow: Rosnedra (Publ.). 1 p. (in Russ.)

¹ For citation: Strahovenko V.D., Malov G.I., Ovdina E.A., Malov V.I. (2023). Mineral composition and formation conditions of bottom sediments of the small lakes if the Ukok Plateau (Altai). *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 54. No. 4. P. 207–225. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2949178923040138>; <https://elibrary.ru/GMDPBK>

- XXIX. Geological map of the Russian Federation. Second edition. Map of Quaternary formations. Gorno-Altai series, scale 1:200000. Moscow: Rosnedra (Publ.). 1 p. (in Russ.)
- GOST 31861-2012. Voda. Obshchiye trebovaniya k otboru prob (GOST 31861-2012. Water. General Sampling Requirements). (2013). Moscow: Standartinform (Publ.). 31 p. (in Russ.)
- Fedak S.I., Turkin Yu.A., Gusev A.I. et al. (2011). Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Altae-Sayanskaya. List M-45 — Gorno-Altaysk. Ob'yasnitel'naya zapiska (State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Altai-Sayan series. Sheet M-45 — Gorno-Altaysk. Explanatory letter.) Saint Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI (Publ.). 567 p. (in Russ.)
- Fotiev S.M. (2009). Kriogennyi metamorfizm porod i podzemnykh vod (usloviya i rezul'taty) (Cryogenic metamorphism of rocks and groundwater (conditions and results)). Novosibirsk: GEO (Publ.). 279 p. (in Russ.)
- Fotiev S.M. (2020). Debatable problems of geocryology: review of achievements. *Earth's cryosphere*. Vol. XXIV. No. 3. P. 3–15.
[https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2020-3\(3-15\)](https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2020-3(3-15))
- Ganyushkin D.A., Chistyakov K.V., Volkov I.V. et al. (2017). Modern data on glaciation of the northern slope of Tavan-Bogdo-Ola massif (Altai). *Ice and Snow*. Vol. 57. No. 3. P. 307–325. (in Russ.)
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-307-325>
- Gerasimova M.I., Lebedeva I.I., Khitrov N.B. (2013). Indexation of soil horizons: state of the problem, problems and suggestions. *Soil Science*. No. 5. P. 627–638.
- Ivanov A.V. (1998). Kriogennaya metamorfizatsiya khimicheskogo sostava prirodnykh l'dov, zamerzayushchikh i talykh vod (Cryogenic metamorphization of the chemical composition of natural ice, freezing and melt waters). Khabarovsk: Dal'nauka (Publ.). 164 p. (in Russ.)
- Kalugin I., Daryin A., Smolyaninova L. et al. (2007). 800 year long annual records of air temperature and precipitation over Southern Siberia inferred from high-resolution time-series of Teletskoye Lake sediments. *Quat. Res.* Vol. 67. Iss. 3. P. 400–410.
<https://doi.org/10.1016/j.yqres.2007.01.007>
- Konishchev V.N. (1998). The ratio of cryogenic and non-cryogenic factors of hypergenesis in the permafrost area. *Vestn. Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya*. No. 1. P. 8–14. (in Russ.)
- Konishchev V.N., Lebedeva-Verba M.P., Rogov V.V., Stalina E.E. (2006). Kriogenez sovremennykh i pozdnepleistotsenovykh otlozhenii Altaya i pereglyatsial'nykh oblasteri Evropy (Cryogenesis of modern and late Pleistocene deposits of Altai and transglacial regions of Europe). Moscow: GEOS (Publ.). 128 p. (in Russ.)
- Lozovik P.A., Efremenko N.A. (Eds.). (2017). Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrokhimicheskoi praktike (Analytical, kinetic and computational methods in hydrochemical practice). St. Petersburg: Nestor-History (Publ.). 272 p. (in Russ.)
- Maslov V.I., Kozlov M.S., Dovgal' V.N. et al. (1994). Complex of ongonites and lithium fluoride granites of southwestern Altai. *Petrologiya*. Vol. 2. No. 3. P. 331–336. (in Russ.)
- Mikhailov N.N. (1994). Lakes of Altai, their origin and history. *Geografiya i prirodopol'zovanie Sibiri*. No. 1. P. 75–89. (in Russ.)
- Mikhailov N.N. (1995). Altai. *Istoriya ozer Severa Azii*. Saint Petersburg: Nauka (Publ.). P. 249–262. (in Russ.)
- Okishev P.A. (2011). Rel'ef i oledenenie Russkogo Altaya (Relief and glaciation of the Russian Altai). Tomsk: TGU (Publ.). 382 p. (in Russ.)
- Panichev A.M., Baranovskaya N.V., Vakh E.A. (2022). New data on the chemical composition of the waters of the Dzhumalinsky geothermal spring, Gorny Altai, Russia. *Polevye issledovaniya v Altaiskom biosfernom zapovednike*. No. 4. P. 137–143. (in Russ.)
https://doi.org/10.52245/26867109_2022_4_137
- Potseluev A.A., Babkin D.I., Kotegov V.I. (2006). Kalgutinskoe complex deposit (Gorny Altai): mineralogical and geochemical characteristics, fluid regime of ore formation. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. Vol. 48. No. 5. P. 439–459. (in Russ.)
- Puzanov A.V., Baboshkina S.V., Balykin S.N. et al. (2020). Chemical elements in soils and surface waters of the Ukok plateau (south-eastern Altai). *Izvestiya TPU. Inzhiniring georesursov*. Iss. 331. No. 1. P. 34–43. (in Russ.)
<https://doi.org/10.18799/24131830/2020/1/2445>
- Rengarten P.A. (Eds.). (1959). Geologicheskaya karta: M-45-XXII, XXVIII. Geologicheskaya karta SSSR. Seriya Gorno-Altayskaya m-ba 1:200000 (Geological map: M-45-XXII, XXVIII. Geological map of the USSR. Series Gorno-Altai scale 1 200 000). Moscow: Gosgeoltekhizdat (Publ.). 1 p. (in Russ.)
- Romanovskii N.N. (1993). Osnovy kriogeneza litosfery (Fundamentals of cryogenesis of the lithosphere). Moscow: Moskovskii universitet (Publ.). 334 p. (in Russ.)
- Rudoi A.N. (1980). On the genesis and age of banded deposits in the Bolshoi Ulagan valley (Gorny Altai). *Voprosy geografii Sibiri*. Vol. 13. Tomsk: Tomskii universitet (Publ.). P. 88–91. (in Russ.)
- Rudoi A.N., Lysenkova Z.V., Rudskii V.V. et al. (2000). Ukok (proshloe, nastoyashchee, budushchee) (Ukok (past, present, future)). Barnaul: Altaiskii gosudarstvennyi universitet (Publ.). 174 p. (in Russ.)
- Rusanov G.G. (2015). Optimum of the Holocene of the South-Eastern Altai on the example of the deposits of the high-mountainous Tarkhatinsky Lake. *Izvestiya AO RGO*. No. 1 (36). P. 81–85. (in Russ.)
- Savenko A.V., Savenko V.S., Pokrovsky O.S. (2020). New data on the concentrations of dissolved trace elements in waters of Russian Arctic rivers. *Dokl. Earth Sci.* Vol. 491. No. 2. P. 257–263.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X20040169>
- Sevast'yanov D.V., Mikhailov N.N. (1994). Lake complexes of Gorny Altai and their evolution in the Holocene. *Vestn. SPbGU. Ser. 7. Geologiya. Geografiya*. No. 3. P. 59–68. (in Russ.)
- Selegey V.V., Selegey T.V. (1978). Teletskoye ozero (Teletskoye Lake). Leningrad: Hydrometeoizdat (Publ.). 142 p. (in Russ.)

- Sokolova E.N., Smirnov S.Z., Annikova I.Y. et al. (2011). Ongonite—elvan magmas of the Kalguty ore-magmatic system (Gorny Altai): composition, fluid regime, and genesis. *Russian Geology and Geophysics*. Vol. 52. No. 11. P. 1378–1400.
<https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.10.017>
- Velichko A.A., Morozova T.D., Nechaev V.P. et al. (1996). *Paleokriogenez, pochvennyi pokrov i zemledelie* (Paleocryogenesis, soil cover and agriculture). Moscow: Nauka (Publ.). 150 p. (in Russ.)
- Wedepohl K.H. (1995). The composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta*. Vol. 59. No. 7. P. 1217–1232.
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2)
- Yaroshevskii A.A. (2004). Problemy sovremennoi geokhimii: konspekt lektsii, pročitannyy v GEOKHI RAN v zimnem semestre 2003–2004 gg. (Problems of modern geochemistry: lecture notes given at GEOKHI RAS in the winter semester 2003–2004). Novosibirsk: NGU (Publ.). 194 p. (in Russ.)
- Yelchinina O.A., Puzanov A.V., Rozhdestvenskaya T.A. (2019). Physico-chemical properties and content of biogenic elements in mountain tundra soils of the Altai Mountains. *Izvestiya AO RGO*. Iss. 55. No. 4. P. 106–111. (in Russ.)
<https://doi.org/10.24411/2410-1192-2019-15512>
- Zarubina E.Yu., Fetter G.V. (2022). Features of the formation of primary production and destruction of organic matter in the mountain lakes of the Russian Altai. *Matly IV Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uch. "Vodnye i ekologicheskie problemy Sibiri i Tsentral'noi Azii", 29 avgusta – 3 sentyabrya 2022 g. T. 2*. Barnaul: Pyat' plus (Publ.). P. 236–241. (in Russ.)