

## ВЛИЯНИЕ БИОГЕОХИМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ ВОДОСБОРНЫХ БАССЕЙНОВ НА МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ВОД ПРИТОКОВ ТЕЛЕЦКОГО ОЗЕРА

Пузанов А. В., Бабошкина С. В., Двуреченская С. Я., Рождественская Т. А.

## IMPACT OF THE BIOGEOCHEMICAL SITUATION AT CATCHMENTS ON THE MICROELEMENT COMPOSITION OF LAKE TELETSKOYE TRIBUTARIES' WATERS

Puzanov A. V., Baboshkina S. V., Dvurechenskaya S. Ya., Rozhdestvenskaya T. A.

### Аннотация

**Введение.** Формирование микроэлементного состава поверхностных вод водоемов и водотоков определяется биогеохимическими процессами на водосборе. Однако схемы и механизмы взаимодействия водотоков и дренируемых ими почв в настоящее время недостаточно изучены. Озеро Телецкое — крупнейший водоем Алтая, одно из глубочайших озер России, площадь его водосборной территории в 90 раз больше площади самого озера. **Методы.** Пробы воды притоков оз. Телецкое отбирали в период летней межени в устьевой части рек. Определение ионного состава вод и водных вытяжек из почв (1:5) проводили по стандартным методикам с титриметрическим окончанием. Содержание микроэлементов (Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn, Pb, Cr, Co, V) в отфильтрованных пробах воды, взвешенном веществе вод и в водных вытяжках из почв определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием электротермической атомизации на приборе SOLAAR M6. **Результаты.** Представлены результаты исследования макро- и микроэлементного состава поверхностных вод притоков оз. Телецкое. Показано, что воды изученных притоков характеризуются очень невысоким суммарным содержанием основных компонентов солевого состава. Найдена зависимость содержания и распределения микроэлементов в системе вода–взвешенное вещество от ландшафтно-геохимических особенностей водосбора. **Заключение.** Содержание водорастворимых форм Cd, Cu, Fe, Mn, Zn, Pb, Co, V в водах притоков оз. Телецкое отвечает экологическим и санитарно-гигиеническим требованиям. Установлено, что в водах притоков озера Fe, Zn, Cr мигрируют в основном в форме растворимых соединений, тогда как Pb, Mn, Cu — преимущественно на взвеси. Выявлено, что различная структура почвенного покрова восточных и западных берегов озера определяет разные условия формирования гидрохимического стока их рек и, как следствие, формирует различия в физико-химическом составе поверхностных вод восточных и западных притоков.

**Ключевые слова:** оз. Телецкое, притоки, микроэлементы, минерализация, растворенная форма, взвешенная форма, почвы, биогеохимическая обстановка.

### Abstract

**Introduction.** The formation of the microelement composition of surface waters in reservoirs and watercourses is determined by the biogeochemical processes in the catchment area. However, the schemes and mechanisms of interaction between watercourses and the soils drained by them have been studied insufficiently. Lake Teletskoye is the largest water reservoir of Altai, one of the deepest lakes in Russia, and its catchment area is 90 times larger than the area of the lake itself. **Methods.** We collected water samples in Lake Teletskoye tributaries during the summer low water period, in the estuaries of rivers. The ionic composition of waters and water extracts from soils (1:5) was determined using standard methods with a titrimetric finish. The content of trace elements (Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn, Pb, Cr, Co, V) in filtered water samples, suspended water matter and water extracts from soils was determined by atomic absorption spectrometry using electrothermal atomization on a SOLAAR M6 device. **Results.** The article presents the results of macro - and microelement composition studies of Lake Teletskoye tributaries' waters. It is shown that the waters of the studied tributaries are characterized by a low total content of the main salt composition components. A dependence of the content and distribution of trace elements in the "water – suspended matter" system on the catchment landscape and geochemical features was found. **Conclusion.** The content of the water-soluble forms of Cd, Cu, Fe, Mn, Zn, Pb, Co, V in Lake Teletskoye tributaries' waters conforms to environmental and sanitary requirements. It was found that Fe, Zn and Cr migrate mainly as the soluble compounds, while Pb, Mn, Cu migrate mainly in suspension. It was revealed that the different soil cover structure of the eastern and western lake shores determines different conditions for the hydrochemical flow formation of their rivers and, as a result, forms the differences in the physical and chemical composition of the eastern and western tributaries' waters.

**Keywords:** Lake Teletskoye, tributaries, microelements, mineralization (salinity), dissolved substance, suspended matter, soils, biogeochemical situation.

**Введение**

Рациональное использование водных ресурсов часто требует более глубокого понимания почвенных процессов [6], поскольку формирование химического состава поверхностных и подземных вод тесно связано с функционированием почвенного покрова водосборной территории [2, 8, 9, 14, 21]. Все водные объекты являются составной частью географического ландшафта, поэтому микроэлементный состав любых водоемов и водотоков определяется в том числе биогеохимическими процессами на их водосборе. И если в настоящее время взаимосвязь природных вод и водосборной территории не вызывает сомнений, то схемы и механизмы взаимодействия водотоков и дренируемых ими почв в конкретных ситуациях пока еще недостаточно изучены.

Цель работы — изучить содержание и распределение микроэлементов в системе вода–взвешенное вещество в водах притоков Телецкого озера и установить связь с физико-химическим составом дренируемых ими почв и биогеохимическими особенностями водосборных бассейнов.

Озеро Телецкое — крупнейший водоем Алтая, одно из глубочайших озер России, с 1998 г. является объектом Всемирного природного наследия ЮНЕСКО. Располагается оно в Северо-Восточной Алтайской провинции [11] среди высоких горных хребтов на высоте 434 м над уровнем моря. Бассейн Телецкого озера является одним из основных туристических и рекреационных районов Алтая. Часть его территории входит в Алтайский государственный природный заповедник, другая часть (пос. Артыбаш, Яйлю, водопад Корбу, бассейн р. Чулышман и Башкаус) в летний период подвергается возрастающей с каждым годом антропогенной нагрузке [7]. Озеро имеет руслообразную форму и представляет собой ледниковый трог, заполненный водой. Глубокая впадина озера — крупнейшее естественное водохранилище [11], вмещающее 40 км<sup>3</sup> чистой пресной воды. Сток воды через верхний створ р. Бии составляет 7 км<sup>3</sup> в год. Озеро питают более 70 рек, но основную массу воды приносит р. Чулышман [4, 7, 11]. Существенное влияние на гидрологию и гидрохимию озера оказывает водосборный бассейн: отношение площади водного зеркала к площади водосбора равно 1:90 (для Байкала это соотношение составляет всего 1:17) [15].

Согласно современной схеме физико-географического районирования Алтая, бассейн Телецкого озера расположен в пределах трех физико-географических провинций Алтайской горной области: северная часть бассейна входит в состав Северо-Восточной провинции, южная, включающая бассейн р. Чулышман, — в состав Восточной и Юго-Восточной провинций [17].

В структуре высотной поясности Северо-Восточной провинции Алтая в целом преобладают горно-лесные ландшафты. Однако отметим, что восточные (правые) притоки Телецкого озера дренируют преимущественно экзарационно-денудационные склоновые поверхности с тундрой и субальпийскими лугами на каменистых примитивных, горно-тундровых и горно-луговых почвах. В ландшафтной структуре бассейнов западных (левых) притоков озера на мощных и переработанных осадочных породах различного происхождения в большей степени представлены лесные сообщества, под которыми формиру-



Рис. 1. Объекты исследования — оз. Телецкое и его притоки, точки отбора проб воды

ются в основном горно-лесные бурые типичные и оподзоленные почвы, реже дерново-подзолистые и серые лесные [11, 17]. В силу влияния более сухого и континентального климата в бассейнах рек Чулышман и Кыга складывается иная ландшафтная структура. Так, в пределах бассейна р. Чулышман, территория которого сама по себе является отдельным интересным объектом для экологических исследований, почвенный покров, из-за разнообразия биогеохимических условий в пределах высотной поясности, отличается существенной неоднородностью: здесь, в пределах высокогорного пояса, формируются в основном горно-тундровые и горно-лугово-степные почвы, а на низких террасах рек и озер — аллювиальные, каштановые почвы [4, 11, 17]. Почвообразующими породами служат в основном рыхлые суглинистые ледниковые или аллювиальные отложения, а коренными породами выступают в основном кислые гранитоиды, содержание металлов в которых ниже, чем в основных породах [3, 6, 13].

Объектами исследования были притоки оз. Телецкое — реки Чулышман, Самыш, Колдор, Большие Чили (западные притоки); Кыга, Кокши, Камга (восточные притоки). Также были отобраны пробы воды в самом озере — в его южной (1,5 км от устья р. Чулышман) и северно-западной (исток р. Бия) частях. Карта-схема точек отбора проб воды приведена на рис. 1. Кроме того, были исследованы верхние горизонты почв в приустьевой части рек (притоков озера) на содержание микроэлементов в их водных вытяжках.

#### Методы и материалы

Пробы воды из притоков оз. Телецкое отбирали в летнюю межень, в устьевой части рек, в чистую полиэтиленовую посуду, фильтровали через мембранный ядерный фильтр (диаметр пор 0,45 мкм), консервировали  $\text{HNO}_3$  (2 мл на 0,5 л) согласно методике [12] и ГОСТ 17.1.5.01–80, ГОСТ 17.1.5.05–85, ГОСТ Р 51592–2000.

Определение ионного состава поверхностных вод и водных вытяжек из почв (1:5) проводили по стандартным методикам, с титриметрическим окончанием [16]: хлор-ион — меркурометрически, сульфат-ион — с нитхромазо, гидрокарбонаты титровались раствором серной кислоты, а жесткость воды (Ca, Mg ионы) — трилоном Б. Определение содержания нитритов проводили

с реактивом Грисса, нитратов — с фенолдисульфо-кислотой, фосфатов — по методу Мачигина, все — с фотоколориметрическим окончанием на приборе КФК-3. pH вод определяли потенциометрически.

Определение содержания микроэлементов (Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn, Pb, Cr, Co, V) в отфильтрованных пробах воды, взвешенном веществе вод и водных вытяжках из почв выполнено в химико-аналитическом центре ИВЭП СО РАН методом атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием электротермической атомизации на приборе SOLAAR M6. Для калибровок прибора использовали стандартные растворы ГСО, контроль правильности определений проводили с помощью метода добавок. Статистическую обработку данных проводили стандартными методами [10], рассчитывали среднее арифметическое, ошибку средней, коэффициент вариации ( $C_v$ , %).

Экологическую оценку содержания элементов в водоемах и водотоках проводили методом сравнения со среднемировыми содержаниями элементов в речных водах [6], оценку загрязнения вод — сравнением с ПДК<sub>вх</sub> [1].

#### Результаты исследования и обсуждение

Воды изученных нами притоков оз. Телецкое (табл. 1) отличаются очень невысоким суммарным содержанием растворимых солей, в среднем 106 мг/дм<sup>3</sup>, и относятся по классификации О. А. Алекина как к классу гидрокарбонатных, так и хлоридно-сульфатных кальциевых вод. Варьирование значений суммарного содержания растворимых солей вод притоков оз. Телецкое незначительное ( $C_v = 28$  % по общей минерализации). Отметим, что в водах рек левых (западных) берегов суммарное содержание солей, как правило, выше, чем в водах правых (восточных) притоков озера.

По содержанию водорастворимых форм металлов воды притоков оз. Телецкое отвечают экологическим и санитарно-гигиеническим требованиям (табл. 2) — концентрации микроэлементов практически не превышают предельно допустимых концентраций (ПДК) для вод объектов хозяйственно-питьевого назначения [1] и среднемировые содержания в речных водах [6]. Исключение составляют никель и хром — их концентрации в водах притоков озера заметно выше

Таблица 1

Содержание основных компонентов солевого состава в реках бассейна оз. Телецкое, мг/дм<sup>3</sup>

Реки	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	pH	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P-PO <sub>4</sub>	Общая минерализация
р. Бия	73,2	2,8	5,3	18	21,6	7,1	<0,003	0,6	0,016	121
Правые (восточные) притоки										
р. Кыга	85,4	5,6	6,2	18	7,2	6,8	<0,003	0,5	0,018	122
р. Кокши	36,6	5,6	2,9	2	<1	7,0	<0,003	0,5	0,013	47
р. Камга	42,7	5,3	2,9	6	2,4	7,8	<0,003	0,6	0,030	59
Левые (западные) притоки										
р. Колдор	97,6	5,2	5,3	26	4,8	6,9	<0,003	0,9	0,028	139
р. Самыш	91,5	5,3	4,8	26	4,8	7,1	0,007	0,8	0,020	140
р. Большие Чили	91,5	4,6	5,8	12	1,2	6,8	<0,003	0,9	0,018	115
р. Чулышман	79,3	4,6	3,8	16	1,2	6,9	<0,003	0,6	0,018	105

приведенных В. В. Добровольским значений. В воде самого озера содержание никеля и хрома наименьшие (см. табл. 2), а по Ni не превышают среднемировых величин. Отметим, что значения концентраций растворимых форм хрома в водах притоков оз. Телецкое в целом соответствуют содержанию его растворимых форм в водах притоков р. Майма (Северный Алтай) [23] и в водах р. Обь в среднем и нижнем ее течении [18]. Содержание водорастворимых форм Ni в водах притоков оз. Телецкое не превышает его концентраций в природных водах других провинций Алтая [23].

Известно, что существенная часть всех транспортируемых речной сетью металлов связана

со взвешенным веществом, присутствующим в воде [5, 6]. Это способствует их дальнейшему осаждению и, таким образом, препятствует излишнему поступлению в живые организмы. Количество (объемная концентрация) металлов в водах притоках озера Телецкое, находящихся во взвешенной форме, приведено в табл. 3.

Нами был произведен расчет доли форм содержания металлов в водах притоков от их общего содержания (рис. 2). Проанализировав полученные величины, можно сказать, что Pb в водах притоков озера мигрирует в основном во взвешенном состоянии (86±3 %, Cv = 3 %, см. рис. 2) и только 9–28 % свинца (в среднем 14±3 %) находится в водах изученных рек в виде

Таблица 2

Содержание растворенных форм металлов в реках бассейна оз. Телецкое, мкг/дм<sup>3</sup>

Место отбора проб	Cd	Cr	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Восточные притоки									
р. Кыга	0,1	7	0,1	0,8	230	1	6	0,4	20
р. Кокши	0,1	7	0,2	1	230	<1	3	<0,2	8
р. Камга	0,02	7	0,1	1	210	2	2	<0,2	8
Западные притоки									
р. Большие Чили	0,1	7	0,2	1	190	<1	5	0,3	20
р. Колдор	0,03	6	0,2	0,8	150	1	4	<0,2	20
р. Самыш	0,02	7	0,1	0,4	310	1	3	<0,2	<4
р. Чулышман	<0,01	7	0,2	0,7	200	4	3	<0,2	20
р. Бия и оз. Телецкое									
р. Бия	0,04	8	0,1	1,5	190	1	2	0,2	10
оз. Телецкое (1,5 км от устья Чулышмана)	0,07	5	0,1	0,9	220	4	1	<0,2	10
Нормативы, среднемировое содержание, K <sub>x</sub>									
ПДК <sub>квх</sub> [1]	1	100	1	1000	300	160	100	30	1000
Среднее содержание в речных водах мира [6]	0,2	1	0,25	7	670	10	2,5	1	20
Коэффициент водной миграции [6]	10,6	3,2	0,29	2,64	0,15	0,12	0,81	0,52	3,27

Таблица 3

Содержание взвешенных форм металлов в реках бассейна оз. Телецкое, мкг/дм<sup>3</sup>

Место отбора проб	Концентрация металлов								
	Cd	Cr	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Правые (восточные) притоки									
р. Кыга	0,05	0,4	0,1	1	60	1	2	1	0,03
р. Кокши	0,04	0,2	0,03	2	50	1	6	1	1
р. Камга	0,03	0,2	0,05	2	90	3	1	1	2
Левые (западные) притоки									
р. Большие Чили	0,1	0,7	0,1	3	140	3	2	1	2
р. Колдор	0,1	2,2	0,4	3	460	3	3	1	5
р. Самыш	0,02	0,6	0,1	2	130	4	2	1	2
р. Чулышман	0,1	0,5	0,1	1	120	5	1	1	1
р. Бия и оз. Телецкое									
р. Бия	0,1	0,4	0,1	1	130	1	2	1	3
оз. Телецкое (1,5 км от устья Чулышмана)	0,1	0,2	0,03	2	110	4	2	1	0,03

растворенных соединений. Mn и Cu также мигрируют преимущественно в форме взвешенных соединений (см. рис. 2) — в среднем, по всем исследованным водотокам, 64±7 % Mn и 66±7 % Cu находятся в форме взвеси. Напротив, 91±2 % (Cv = 9 %) хрома, 85±4% (Cv = 16 %) цинка и 64±4 % (Cv = 26 %) железа в водах рек бассейна оз. Телецкое находятся в растворенной форме.

Миграционную способность элементов в ландшафте принято выражать частным от деления содержания элемента в минеральном остатке речной воды на его содержание в горных

породах, дренируемых рекой и ее притоками:  $K_x = m_x \cdot 100 / a \cdot n_x$ , где  $K_x$  — коэффициент водной миграции элемента  $x$ ;  $m_x$  — содержание элемента  $x$  в речной воде в г/дм<sup>3</sup>;  $a$  — сумма минеральных веществ, содержащихся в воде данной реки в г/дм<sup>3</sup>;  $n_x$  — среднее содержание элемента  $x$  в водовмещающих породах бассейна рассматриваемой реки, в % [13]. Хром и цинк, по данным В. В. Добровольского [6], имеют наиболее высокие (после Cd) коэффициенты водной миграции, тогда как железо и марганец — самые низкие. Однако по результатам нашего исследования, бо-

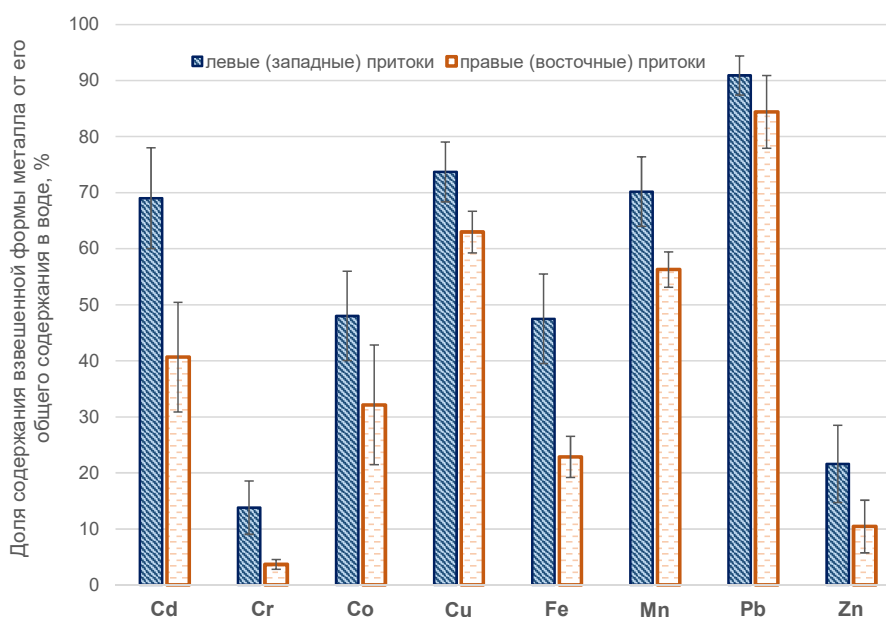


Рис. 2. Процентное содержание взвешенных форм металлов от их общего содержания в водах левых и правых притоков оз. Телецкое

лее половины общего содержания железа (как и Cr и Zn) в водах притоков оз. Телецкое находится в растворимой форме. Объяснить это можно тем, что в почвенном покрове водосборного бассейна озера горно-лесные бурые и мерзлотно-таежные почвы кедрово-пихтовых лесов чередуются с обширными массивами болотных почв. В условиях восстановительной обстановки и кислой реакции среды почвенного покрова заболоченных участков закономерно ожидать, что железо будет мигрировать в форме водорастворимых соединений, так как происходит восстановление  $Fe^{3+}$  до  $Fe^{2+}$ .

Что касается никеля, то процентное содержание его водорастворимых форм от общего количества в водах притоков оз. Телецкое изменяется от 33 % (р. Кокши) до 75 % (реки Кыга, Самыш), в среднем составляя  $58 \pm 5$  %. Таким образом, интенсивность водной миграции Ni в водах притоков оз. Телецкое оказалась выше, чем у Cu, Pb, Mn. Большую подвижность и растворимость никеля по сравнению с медью и свинцом отмечают, например, исследователи кислых ферралитовых почв Бразилии: в экспериментах с почвенными колонками вынос никеля в природные воды оказался более выражен, чем миграция Pb и Cu [19].

Наиболее высокий коэффициент водной миграции, по литературным данным, из исследованных нами микроэлементов имеет кадмий [6]. По результатам нашего исследования в водах левых (западных) притоков кадмий находится преимущественно во взвешенном состоянии, тогда как в водах правых (восточных) притоков содержание его водорастворимых форм заметно выше,

чем взвешенных (см. рис. 2). Разница процентных содержаний взвешенных форм металлов между левыми и правыми притоками озера заметна и по другим элементам.

Дело в том, что на левом (западном) берегу оз. Телецкое заметно больше распространены мощные и переработанные суглинистые осадочные толщи со зрелыми сформированными почвами. Восточный берег в большей степени занят примитивными грубодисперсными литогенными почвенными образованиями. Поэтому в западных притоках озера (реки Самыш, Колдор, Б. Чили, а также Чулышман) общее содержание взвешенного вещества (рис. 3), а также доля взвешенных форм элементов от их общего содержания (см. рис. 2) существенно выше, чем мутность вод и доля взвешенных форм металлов (для Cd, Cr, Cu, Fe, Mn — статистически достоверно) в водах восточных притоков озера (реки Кыга, Кокши, Камга). Более зрелые и сформированные почвы водосборных бассейнов западных (левых) берегов озера вносят более значимый вклад в гидрохимический сток — в них более интенсивно происходит преобразование первичных минералов, они содержат большее количество органического вещества, хрупкого переработанного материала, в них больше содержится тонких продуктов денудации почвенного покрова (см. рис. 3), за счет которых формируются речные взвеси. Отметим также, что мутность вод притоков увеличивается в целом по направлению с юга на север, «вниз по течению», от устья рек Чулышман и Кыга к истоку р. Бия, в ряду Чулышман < Б. Чили < Самыш < Колдор (западный берег) и Кыга < Кокши < Камга (восточный берег) (см. рис. 3). В том же направлении возрастает содержание взвешенных форм Fe, Cu, Zn (см. табл. 3).

Существенную роль в формировании химического состава поверхностных вод играет и буферная способность почв, определяющая возможность и степень закрепления типоморфных элементов на сорбционном барьере [6, 22]. Так, например, в работе [7] доказано, что наличие гумусового вещества в почвах существенно снижает выщелачивание микроэлементов в условиях слабокислых транзитных лесных ландшафтов горных регионов Алтая. В работе [20] по исследованию лесов Северо-Восточной Амазонии показано, что влияние водосбора на экспорт ве-

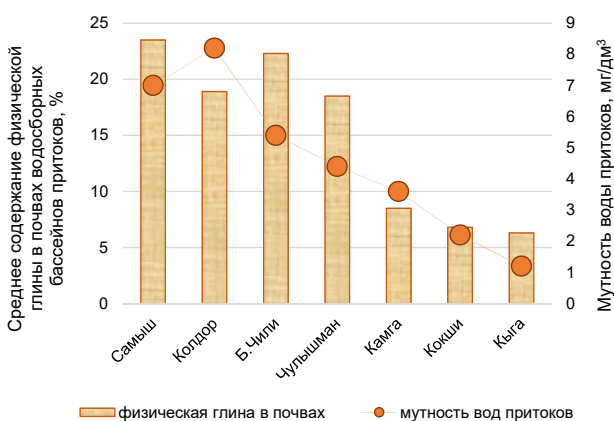


Рис. 3. Содержание физической глины в почвах водосборных бассейнов притоков оз. Телецкое и мутность их вод

щества в водотоки выражено в большей степени на вырубках, чем на нетронутых облесенных участках, где влияние на гидрохимию водотока заметно слабее, хотя внутренняя рециркуляция микроэлементов значительна.

В верхней части лесного пояса западного (левого) берега Телецкого озера распространены преимущественно горно-лесные бурые и горно-лесные мерзлотно-таежные почвы с кислой реакцией среды; в их профиле периодически возникают процессы переувлажнения. Кроме того, в долинах западных притоков часто встречаются мелкие подпруженные и заболоченные озера ледникового происхождения и болотные массивы [17], где развиты торфяники и болотные почвы с кислой реакцией среды и восстановительными условиями, благоприятными для образования подвижных водорастворимых форм железа [6, 13, 22, 24]. Все это определяет насыщенность верхних горизонтов почв водосборов притоков западного берега Телецкого озера водорастворимым железом (в среднем его содержание здесь составляет  $1564 \pm 387$  мкгFe/дм<sup>3</sup> водной вытяжки из почв). Однако в силу буферной способности горно-таежных почв трансаккумулятивных ландшафтов западного берега Телецкого озера [7], железо, очевидно, аккумулируется в их иллювиальных горизонтах, более прочно фиксируется в составе почвенных микроагрегатов и в меньших количествах попадает в воды дренирующих водотоков. Величина отношения концентрации железа в водах к содержанию его в почвенных водных вытяжках в среднем равна 0,13.

На правом берегу оз. Телецкое более распространены каменистые слабообразованные почвенные образования. Содержание водорастворимых форм железа в верхних почвенных горизонтах здесь заметно ниже (в среднем,  $997 \pm 257$  мкгFe/дм<sup>3</sup> водной вытяжки), чем на противоположном, левом берегу. Однако отношение концентрации растворимых форм железа в водах к его содержанию в почвенных вытяжках здесь выше (в среднем эта величина равна 0,2). Крутые склоны и низкое содержание сорбирующих веществ в почвах восточных берегов оз. Телецкое благоприятствуют сравнительно более активному выносу и поступлению растворимых форм железа в речную сеть.

#### **Заключение**

1. Содержание водорастворимых форм металлов в водах притоков оз. Телецкое отвечает экологическим и санитарно-гигиеническим требованиям, за исключением более высоких по сравнению со среднемировыми значениями концентраций хрома и никеля.

2. В водах притоков озера в составе водорастворимых соединений находятся 64 % от общего содержания железа, 85 % цинка и 91 % хрома; хром и цинк имеют одни из самых высоких коэффициентов водной миграции, а высокая подвижность железа объясняется подходящей для этого биогеохимической обстановкой на водосборе — кислой реакцией среды и периодически возникающими восстановительными условиями в почвенном покрове заболоченных участков, которые часто встречаются в бассейнах притоков озера.

3. Более половины от содержания свинца, марганца, меди мигрируют в водах притоков Телецкого озера в форме взвеси.

4. В западных притоках озера общее содержание взвешенного вещества, а также доля взвешенных форм элементов от их общего содержания существенно выше, чем в водах восточных притоков озера, что объясняется большим распространением на западном берегу зрелых, сформированных почв, которые содержат больше денудационного материала и вносят более значимый вклад в формирование речных взвесей и гидрохимического стока.

5. Крутые склоны и низкое содержание сорбирующих веществ в каменистых слабообразованных почвах восточных берегов оз. Телецкое благоприятствуют более интенсивному выносу растворимых форм типоморфных в данной биогеохимической обстановке элементов, что выражено на примере более активного поступления в речную сеть водорастворимого железа.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института водных и экологических проблем СО РАН. Научная программа IX.134.1. «Исследование палео- и современных изменений состояния водоемов и водотоков Сибири, анализ природных и антропогенных изменений для стратегии охраны, использования и обеспечения безопасности водных ресурсов Сибири», проект № 0383-2019-0005.

Авторы выражают глубокую признательность научному сотруднику ИВЭП СО РАН Д. Н. Балыкину, старшему научному сотруднику ИВЭП СО РАН

С. Н. Балыкину и главному специалисту отдела экологической безопасности ФГУП «ЦЭНКИ» И. В. Горбачеву за помощь в проведении экспедиционных работ и пробоподготовку; ведущему инженеру ИВЭП СО РАН Г. М. Медниковой — за проведение химического анализа проб.

#### Литература

1. Беспамятнов, Г. П. и Кротов, Ю. А. (1985). Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде. Л.: Химия, 528 с.
2. Болдескул, А. Г., Бурдуковский, М. Л., Луценко, Т. Н., Кожевникова, Н. К., Шамов, В. В. и Губарева, Т. С. (2019). Роль почв в формировании состава природных вод в ландшафтах хвойно-широколиственных лесов Центрального Сихотэ-Алиня. В: Лесные почвы и функционирование лесных экосистем: материалы VII Всероссийской научной конференции с международным участием, 24–27 сентября 2019 г. М.: Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, сс. 164–167.
3. Виноградов, А. П. (1962). Среднее содержание химических элементов в горных породах. Геохимия, № 7, сс. 555–571.
4. Винокуров, Ю. И. и Красноярова, Б. А. (ред.) (2016). География Сибири в начале XXI века: в 6 т. Т. 5. Западная Сибирь. Новосибирск: Гео, 447 с.
5. Гордеев, В. В. (1983). Речной сток в океан и черты его геохимии. М.: Наука, 160 с.
6. Добровольский, В. В. (1983). География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М.: Мысль, 272 с.
7. Ельчинова, О. А., Кузнецова, О. В., Рождественская, Т. А., Кайзер, М. И. и Вышникова, Т. В. (2019). Эколого-биогеохимическая оценка почв горно-лесного пояса бассейна Телецкого озера. Успехи современного естествознания, № 4, сс. 51–56.
8. Желязко, В. И. (2008). Миграция тяжёлых металлов с внутрисочвенным стоком при орошении. Мелиорация и водное хозяйство, № 6, сс. 33–34.
9. Иванов, С. В., Гук, М. Г., Фазылова, Ф. Р. и Плиско, Е. Ф. (2018). Взаимосвязь химического состава почвы и поверхностных вод Республики Крым и их влияние на развитие эндемических заболеваний. Центральный научный вестник, Т. 3, № 10 (51), сс. 15–19.
10. Лакин, Г. Ф. (1990). Биометрия. 4-е изд. М.: Высшая школа, 352 с.
11. Маринин, А. М. и Самойлова, Г. С. (1987). Физическая география Горного Алтая. Барнаул: БГПИ, 109 с.
12. Новиков, Ю. В., Ласточкин, К. О. и Болдина, З. Н. (1990). Методы исследования качества воды водоемов. 2-е изд. М.: Медицина, 400 с.
13. Перельман, А. И. (1989). Геохимия. 2-е изд. М.: Высшая Школа, 528 с.
14. Савич, В. И., Белопухов, С. Л., Подволоцкая, Г. Б., Чилингарян, Н. О. и Гукалов, В. В. (2018). К вопросу о взаимосвязи почв и поверхностных вод, как компонентов ландшафта. Природообустройство, № 1, сс. 76–83. DOI: 10.26897/1997-6011/2018-1-76-83.

15. Селегей, В. В. и Селегей, Т. С. (1978). Телецкое озеро. Л.: Гидрометеиздат, 142 с.

16. Соколов, А. В. (ред.) (1975). Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 656 с.

17. Черных Д. В. и Самойлова, Г. С. (2011). Ландшафты Алтая (Республика Алтай и Алтайский край) Карта М - 1:500000. Новосибирск: Новосибирская картографическая фабрика.

18. Эйрих, А. Н. и Серых, Т. Г. (2010). Содержание микроэлементов в воде бассейна реки Обь. Мир науки, культуры, образования, № 6, сс. 245–248.

19. Cornu, S., Neal, C., Ambrosi, J.-P., Whitehead, P., Neal, M., Sigolo, J. and Vachier, P. (2001). The environmental impact of heavy metals from sewage sludge in ferralsols (São Paulo, Brazil). *Science of the Total Environment*, Vol. 271, Issue 1–3, pp. 27–48. DOI: 10.1016/S0048-9697(00)00814-7.

20. Forti, M. C., Boulet, R., Melfi, A. J. and Neal, C. (2000). Hydrogeochemistry of a small catchment in Northeastern Amazonia: a comparison between natural with deforested parts of the catchment (Serra do Navio, Amapá State, Brazil). *Water, Air, and Soil Pollution*, Vol. 118, Issue 3–4, pp. 263–279. DOI: 10.1023/A:1005155706417.

21. Ikem, A. and Adisa, S. (2011). Runoff effect on eutrophic lake water quality and heavy metal distribution in recent littoral sediment. *Chemosphere*, Vol. 82, Issue 2, pp. 259–267. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2010.09.048.

22. Kabata-Pendias, A. (2011). Trace elements in soils and plants. 4<sup>th</sup> edition. Boca Raton: CRC Press, 548 p.

23. Puzanov, A. V., Baboshkina, S. V. and Gorbachev, I. V. (2015). Concentration and distribution of major macro- and microelements in surface waters in the Altai. *Water Resources*, Vol. 42, Issue 3, pp. 340–351.

24. Ratić, G., Vantelon, D., Kalahroodi, E. L., Bihannic, I., Pierson-Wickmann, A. C. and Davranche, M. (2019). Iron speciation at the riverbank surface in wetland and potential impact on the mobility of trace metals. *Science of the Total Environment*, Vol. 651, Part 1, pp. 443–455. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.143.

#### References

1. Bepamyatnov, G. P., and Krotov, Yu. A. (1985). Maximum allowable concentrations of chemicals in the environment. Leningrad: Khimiya, 528 p.
2. Boldeskul, A. G., Burdukovsky, M. L., Lutsenko, T. N., Kozhevnikova, N. K., Shamov, V. V. and Gubareva, T. S. (2019). The role of soils in the formation of the composition of natural waters in the landscapes of mixed coniferous-broad-leaved forest ecosystems of the Central Sikhote-Alin. In: Forest soils and the functioning of forest ecosystems. Proceedings of the VII All-Russian Scientific Conference with international participation "", September 24–27, 2019. Moscow: Center of Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences, pp. 164–167.
3. Vinogradov, A. P. (1962). Average content of chemical elements in the rocks. *Geochemistry*, No. 7, pp. 555–571.
4. Vinokurov, Yu. I. and Krasnoyarova B. A. (eds) (2016). Geography of Siberia in the early 21<sup>st</sup> century: in 6 vol. Vol. 5. Western Siberia. Novosibirsk: Geo, 447 p.
5. Gordeyev, V. V. (1983). River runoff into the ocean and features of its geochemistry. Moscow: Nauka, 160 p.



6. Dobrovolsky, V. V. (1983). Geography of trace elements. Global scattering. Moscow: Mysl, 272 p.
7. Elchinina, O. A., Kuznetsova, O. V., Rozhdestvenskaya, T. A., Kayzer, M. I. and Vyshnikova, T. V. (2019). Ecological and biogeochemical assessment of soils of the mountain forest belt of Teletskoye Lake basin. *Advances in Current Natural Sciences*, No. 4, pp. 51–56.
8. Zhelyazko, V. I. (2008). Heavy metals migration in soils under irrigation. *Land Reclamation and Water Management*, No. 6, pp. 33–34.
9. Ivanov, S. V., Guk, M. G., Fazylova, F. R. and Plisko, E. F. (2018). Relationship of chemical composition of soil and surface waters of the Republic of Crimea and their influence on development of endemic diseases. *Central Science Bulletin*, Vol. 3, No. 10 (51), pp. 15–19.
10. Lakin, G. F. (1990). Biometry. 4<sup>th</sup> edition. Moscow: Vysshaya Shkola, 352 p.
11. Marinin, A. M., Samoylova, G. S. (1987). Physical geography of the Altai Mountains. Barnaul: Barnaul State Pedagogical Institute, 109 p.
12. Novikov, Yu. V., Lastochkina, K. O. and Boldina, Z. N. (1990). Methods of water quality studies in water bodies. 2<sup>nd</sup> edition. Moscow: Meditsina, 400 p.
13. Perelman, A. I. (1989). Geochemistry. 2<sup>nd</sup> edition. Moscow: Vysshaya Shkola, 528 p.
14. Savich, V. I., Belopukhov, S. L., Podvolotskaya, G. B., Chilingaryan, N. O. and Gukalov, V. V. (2018). Regarding the problem of interrelation of soils and surface water as landscape components. *Environmental Engineering*, No. 1, pp. 76–83. DOI: 10.26897/1997-6011/2018-1-76-83.
15. Selegey, V. V. and Selegey, T. S. (1978). Teletskoye Lake. Leningrad: Gidrometeoizdat, 142 p.
16. Sokolov, A. V. (ed.) (1975). Agrochemical methods of soils research. Moscow: Nauka, 656 p.
17. Chernykh, D. V., Samoylova, G. S. (2011). Landscapes of Altai (Altai Republic and Altai Territory). Map M - 1: 500000. Novosibirsk: Novosibirsk Cartographic Factory.
18. Eyrikh, A. N. and Seryck, T. G. (2010). Contents of trace elements in water basin Ob river. *World of Science, Culture, Education*. No. 6, pp. 245–248.
19. Cornu, S., Neal, C., Ambrosi, J.-P., Whitehead, P., Neal, M., Sigolo, J. and Vachier, P. (2001). The environmental impact of heavy metals from sewage sludge in ferralsols (São Paulo, Brazil). *Science of the Total Environment*, Vol. 271, Issue 1–3, pp. 27–48. DOI: 10.1016/S0048-9697(00)00814-7.
20. Forti, M. C., Boulet, R., Melfi, A. J. and Neal, C. (2000). Hydrogeochemistry of a small catchment in Northeastern Amazonia: a comparison between natural with deforested parts of the catchment (Serra do Navio, Amapá State, Brazil). *Water, Air, and Soil Pollution*, Vol. 118, Issue 3–4, pp. 263–279. DOI: 10.1023/A:1005155706417.
21. Ikem, A. and Adisa, S. (2011). Runoff effect on eutrophic lake water quality and heavy metal distribution in recent littoral sediment. *Chemosphere*, Vol. 82, Issue 2, pp. 259–267. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2010.09.048.
22. Kabata-Pendias, A. (2011). Trace elements in soils and plants. 4<sup>th</sup> edition. Boca Raton: CRC Press, 548 p.
23. Puzanov, A. V., Baboshkina, S. V. and Gorbachev, I. V. (2015). Concentration and distribution of major macro- and microelements in surface waters in the Altai. *Water Resources*, Vol. 42, Issue 3, pp. 340–351.
24. Ratić, G., Vantelon, D., Kalahroodi, E. L., Bihannic, I., Pierson-Wickmann, A. C. and Davranche, M. (2019). Iron speciation at the riverbank surface in wetland and potential impact on the mobility of trace metals. *Science of the Total Environment*, Vol. 651, Part 1, pp. 443–455. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.143.

#### Авторы

**Пузанов Александр Васильевич**, д-р биол. наук, профессор

Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, г. Барнаул, Россия

E-mail: puzanov@iwep.ru

**Бабошкина Светлана Вадимовна**, канд. биол. наук

Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, г. Барнаул, Россия

E-mail: arsenida@rambler.ru

**Двуреченская Серафима Яковлевна**, канд. хим. наук, доцент

Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, г. Барнаул, Россия

E-mail: dvur@iwep.nsc.ru, serafima\_dv@mail.ru

**Рождественская Тамара Анатольевна**, канд. биол. наук

Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, г. Барнаул, Россия

E-mail: rtamara@iwep.ru

#### Authors

**Puzanov Alexandr Vasilyevich**, Dr. of Biology, Professor  
Institute for Water and Environmental Problems, Siberian  
Branch of the Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia

E-mail: puzanov@iwep.ru

**Baboshkina Svetlana Vadimovna**, PhD. in Biology  
Institute for Water and Environmental Problems, Siberian  
Branch of the Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia

E-mail: arsenida@rambler.ru

**Dvurechenskaya Serafima Yakovlevna**, PhD. in  
Chemistry, Associate Professor

Institute for Water and Environmental Problems, Siberian  
Branch of the Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia

E-mail: dvur@iwep.nsc.ru, serafima\_dv@mail.ru

**Rozhdestvenskaya Tamara Anatol'evna**, PhD. in Biology  
Institute for Water and Environmental Problems, Siberian  
Branch of the Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia

E-mail: rtamara@iwep.ru