

УДК 556:556.314:550.47

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ГЛАВНЫХ ИОНОВ В ВОДАХ ПРИТОКОВ ОЗЕРА ТЕЛЕЦКОГО В СВЯЗИ С БИОГЕОХИМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКОЙ ИХ ВОДОСБОРНЫХ БАССЕЙНОВ¹

© 2024 г. А. В. Пузанов^a, С. В. Бабошкина^{a, *}, Т. А. Рождественская^a, С. Н. Балыкин^a,
Д. Н. Балыкин^a, А. В. Салтыков^a, И. А. Трошкова^a, С. Я. Двуреченская^a

^aИнститут Водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, 656038 Россия

*e-mail: svetlana@iwer.ru

Поступила в редакцию 03.08.2021 г.

После доработки 10.12.2023 г.

Принята к публикации 22.01.2024 г.

Исследовано содержание главных ионов (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и K^+) в водах притоков оз. Телецкого (Северо-Восточный Алтай) в 2016–2020 гг. Установлена сезонная изменчивость ионного состава вод притоков озера и его связь с биогеохимической обстановкой их водосборных бассейнов. Выявлено, что воды восточных и западных притоков, дренирующие различные по геологической и ландшафтной структуре берега, отличаются как по содержанию, так и по соотношению главных ионов. Показано, что большинство изученных притоков относится к одной гидрогеохимической фации и несет воды бикарбонатно-магниево-кальциевого типа. Рассчитаны показатели ионного стока трех притоков озера; оценена химическая денудация в их водосборных бассейнах.

Ключевые слова: озеро Телецкое, притоки, водосбор, главные ионы, ионный сток.

DOI: 10.31857/S0321059624040082 **EDN:** APJEJS

ВВЕДЕНИЕ

Формирование поверхностных и подземных вод тесно связано с функционированием почвенного покрова водосборной территории. Еще В.И. Вернадский в своих трудах отмечал, что “...почвенные растворы бассейна реки определяют основную составную часть солевого состава речной воды...” [4]. Все водоемы и водотоки являются частью географического ландшафта, их питание минеральными элементами зависит от биогеохимических процессов на водосборе [7, 30], вида хозяйственной деятельности в пределах речных бассейнов [1, 6, 31]. Несмотря на усиливающийся в последние годы интерес к гидрохимии устьевых областей рек, некоторые вопросы преобразования химического состава речного стока до сих пор недостаточно изучены [16].

Ионный сток составляет основную часть стока растворенных веществ (95%), поэтому по величине ионного стока реки можно проанализировать изменчивость ее химической денудации [1, 7], которая в бассейнах рек горных территорий пока еще изучена не в полной мере [1]. Трансформация стока главных ионов в бассейнах рек является основным индикатором климатических изменений; коэффициенты стока могут быть использованы для расчетов поступления влаги и растворенных веществ с водосборов [29].

Цель работы – изучить содержание и многолетнюю динамику главных компонентов солевого состава вод притоков оз. Телецкого в связи с биогеохимическими особенностями их водосборных бассейнов.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Телецкое – одно из самых глубоких озер России и крупнейший пресноводный водоем Ал-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (проект FUFZ-2021-0003).

тая, с 1998 г. — объект Всемирного природного наследия ЮНЕСКО. Озеро располагается среди высоких горных хребтов на высоте 434 м над у. м., имеет руслообразную форму и представляет собой глубокий ледниковый трог, заполненный водой объемом 40 км^3 [13, 18]. Озеро питают более 70 рек, но основную массу воды (<80%) приносит р. Чулышман $\sim 5 \text{ км}^3$ в год [3, 18]. Акваторию озера условно делят на две части: южную, или меридиональную (от устья р. Чулышман до мыса Купоросный, 50 км), и северо-западную, или широтную (до истока р. Бия, 28 км). Сток воды через верхний створ р. Бии составляет 7 км^3 в год [18].

Бассейн оз. Телецкого — один из основных туристических и рекреационных районов Алтая. В летний период бассейны рек Большие Чили, Малые Чили, Чулышман, а также поселки Артыбаш и Яйлю подвергаются возрастающей с каждым годом антропогенной нагрузке [9]. В бассейнах рек, впадающих в северную часть озера, проводятся вырубki леса. Восточная часть водосборной территории озера входит в Алтайский государственный природный заповедник, здесь воздействие на окружающую среду минимально, но проявляется на участке возле водопада Корбу.

Водосборный бассейн оз. Телецкого существенно влияет на гидрологию и гидрохимию его воды: отношение площади водного зеркала к площади водосбора равно 1 : 90 (для Байкала это соотношение составляет всего 1 : 17) [19]. Озеро окружено горами высотой 600–1300 м в широтной части и 1700–2400 м в меридиональной. Берега озера в основном скальные и обрывистые, сложены крупными валунами и обломочным гранитным и сланцевым материалом. Лишь в устьях рек Чулышман, Кыга, Кокши, Колдор, Самыш встречаются песчаные и галечные берега. Бухт и заливов мало (Камгинский, Кыгинский).

Ландшафт бассейна оз. Телецкого на >50% представлен лесными сообществами. С юга на север залесенность бассейна озера увеличивается [19]. На севере преобладают кедрово-пихтовые леса с примесью сосны, а на юге — кедрово-лиственничные. Есть мнение, что на лесных территориях водосборов взаимосвязь между потоками

вещества и химическими показателями качества воды наиболее сильная [30]. Обширные территории бассейнов некоторых притоков оз. Телецкого заболочены, это существенный фактор формирования их химического состава. Например, заболоченность водосборной территории Средней Оби обуславливает снижение ионного стока на 7% [17].

Почвенный покров территории бассейна характеризуется вертикальной зональностью и широтной поясностью. В ландшафтной структуре бассейнов западных (левых) притоков оз. Телецкого в большей степени представлены кедрово-таежные лесные сообщества с горно-лесными бурыми типичными и оподзоленными, реже дерново-подзолистыми и серыми лесными почвами [13, 22] на мощных переработанных осадочных породах. Восточные (правые) притоки озера преимущественно дренируют экзарационно-денудационные склоновые поверхности с каменистыми примитивными горно-тундровыми и горно-луговыми почвами. В южной части бассейна озера, в бассейне р. Чулышман, занимающем >80% площади водосбора озера, почвенный покров из-за разнообразия биогеохимических условий в пределах высотной поясности отличается существенной неоднородностью — в высокогорном поясе бассейна реки формируются в основном горно-тундровые и горно-лугово-степные почвы, в среднем поясе — горно-лесные бурые почвы под кедрово-лиственничными лесами, а на низких террасах — аллювиальные и каштановые почвы [13, 19, 22], почвообразующими породами для них служат в основном рыхлые суглинистые ледниковые или аллювиальные отложения.

Формирование химического состава вод различных притоков оз. Телецкого и поступление ионов в водоем впервые подробно были исследованы в 1980-х гг. А.М. Малолетко и Т.П. Шестаковой [12].

Объектами исследования были реки Чулышман — наиболее крупный приток озера, Камга — правый крупный приток широтной части озера, Кыга — крупный приток южной части озера. В широтной (северной) части озера исследованы реки Колдор и Самыш, в меридиональной части

на западном берегу — реки Большие Чили и Малые Чили, а также малая р. Чедор, на восточном — крупная р. Кокши, малые реки — Корбу и Челюш, руч. Верхний Камелик, протекающий через маленький пос. Беле. Некоторые реки в устьевой части образуют конусы выноса и сразу за береговой полосой заболочены (Чулышман, Кыга, Камга, Колдор, Самыш), другие практически не имеют долин, впадают в озеро водопадом (р. Корбу). В самом озере пробы воды отбирались в его северной (широтной) части у пос. Яйлю. Картограмма расположения рек, в которых регулярно отбирались пробы воды, приведена на рис. 1.

Исследование сезонной и годовой изменчивости компонентов ионного состава вод притоков оз. Телецкого проводилось в 2016–2020 гг., в периоды весенне-летнего половодья и осенней межени. Пробы воды из притоков оз. Телецкого отбирали в чистую полиэтиленовую посуду в устьевой части рек, где происходит наиболее интенсивный вынос химических веществ.

Ионный состав поверхностных вод определяли по стандартным методикам [14]: хлор-

идон определяли меркурометрическим методом, гидрокарбонаты титровали раствором серной кислоты, сульфат-ион определяли турбидиметрическим методом на спектрофотометре “ПЭ-5400ВИ”. Жесткость воды и кальций определяли комплексонометрическим методом (титровали трилоном Б), магний вычисляли по разнице. pH вод определяли потенциометрическим методом на иономере “рН-150МИ”. Содержание натрия и калия в 2016–2017 гг. определяли по разности. В 2018 и 2019 гг. натрий, калий, кальций и магний дополнительно определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии в Химико-аналитическом центре ИГиМ СО РАН на приборе “IRIS Advantage Thermo Jarrell Ash corp.” (1999 г.), а в 2020 г. — в химико-аналитическом центре ИВЭП СО РАН методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP MS) на приборе “ICAP-Qc”. Достоверность полученных данных о содержании натрия, калия, кальция и магния в изученных водах притоков оз. Телецкого подтверждается хорошей сходимостью результатов определения разными методами. Всего было отобрано и проанализировано более 130 проб воды.

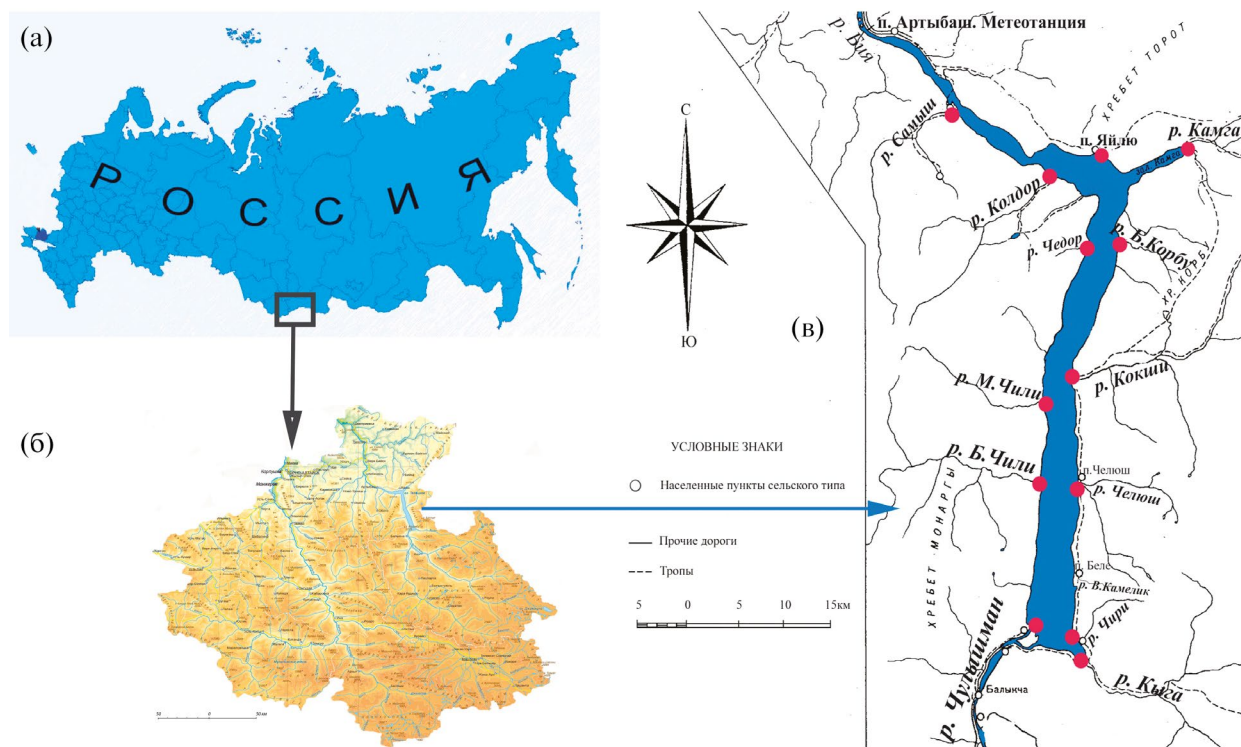


Рис. 1. Картограмма района исследования: а — на карте РФ; б — на карте Республики Алтай; в — фрагмент карты бассейна оз. Телецкого с пунктами отбора проб.

Статистическую обработку данных проводили стандартными методами: рассчитывали среднее арифметическое, ошибку среднего, коэффициенты вариации и коэффициенты корреляции [10].

Данные о погоде в периоды, предшествующие отборам проб, получены в [3]; архив данных имеется только по метеостанции Артыбаш.

По средневзвешенным за год концентрациям главных ионов в атмосферных осадках, а также среднегодового количества осадков, площади водосборных бассейнов [19] и с учетом коэффициента стока веществ с водосбора 0.33 [18] рассчитаны поступления ионов из атмосферы на водосборы и в реки бассейна озера.

Интенсивность химической денудации в разных по величине речных бассейнах оценивали по величине модуля ионного стока – количеству растворимого вещества (t), переносимого с единицы площади водосборного бассейна в единицу времени, по формуле: $M_{ions} = (Q/F)C$, где Q – расход воды, л/с; F – площадь водосбора, км²; C – суммарное содержание главных ионов, мг/л. Для расчетов использованы полученные данные о содержании главных ионов в водах, а также данные о среднесуточных расходах воды, м³/с [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общее содержание водорастворимых солей в водах притоков оз. Телецкого очень невысокое и варьирует от 0.02 до 0.16 г/л (табл. 1). Исследуемые воды по классификации С.Л. Шварцева можно отнести к классу пресных вод, подклассу ультрапресных.

За 5 лет содержание гидрокарбонатов в водах притоков оз. Телецкого варьировало от 6.0 до 103.7 мг/л, хлоридов от 0.4 до 6.3, сульфатов от 3.1 до 12.5, кальция от 1 до 32, магния от 0.5 до 7.2 мг/л. Для сравнения, по результатам прошлых исследований авторов статьи, в реках Северо-Восточного и Восточного Алтая среднее содержание гидрокарбонатов составляло 82 ± 7 мг/л, хлоридов 4.8 ± 0.2 , сульфатов 4.8 ± 0.3 , кальция 16 ± 2 , магния 6.5 ± 1.9 мг/л [15]. Наименьшим содержанием водорастворимых солей

отличаются притоки восточного берега меридиональной части озера, берущие свое начало на хребте г. Корбу, сложенном гранитами: суммарное содержание главных ионов в реках Корбу и Кокши в 2016–2020 гг. было более чем в 2 раза ниже, чем в других притоках (табл. 1), варьировало от 18.6 до 34.1 мг/л, а pH изменялся в пределах 6.6–7.4 и, как правило, был самым низким среди всех изученных притоков. Согласно исследованиям других авторов, в 2009 г. в сентябре минимальное суммарное содержание водорастворимых солей также было зафиксировано в реках Корбу и Кокши – 24.8 и 20.8 мг/л соответственно, в этих же реках был отмечен самый низкий pH воды (6.1 и 6.3) [8].

По содержанию и соотношению главных ионов воды реки Корбу и Кокши, берущие свое начало на одной вершине гранитного сложения, похожи между собой и заметно отличаются от других притоков озера. В водах этих рек очень невысокие концентрации кальция и магния (табл. 1), что обусловлено преобладанием некарбонатных пород по берегам озера в районе р. Корбу [12] – известно, что в гранитном слое земной коры содержание карбонатов в 3 раза меньше, чем в осадочной толще [7]. Содержание натрия и калия в реках Корбу и Кокши, наоборот, повышено и более чем в 2 раза выше, чем в других реках.

Другой восточный приток меридиональной части озера – р. Челюш также характеризуется невысоким уровнем общей минерализации воды (табл. 1). Низкое суммарное содержание главных ионов в водах р. Челюш отмечал в свое время и А.М. Малолетко (50–80 мг/л), связывая этот факт с особенностями питания этой реки от снежников с гольцов [12].

Более крупные восточные притоки оз. Телецкого характеризуются заметно более высоким уровнем общей минерализации вод, причем р. Кыга (южная оконечность озера) отличается большим диапазоном значений этого показателя (65.1–104.6 мг/л), чем р. Камга (северная оконечность озера; 63.0–88.8 мг/л).

Самое высокое суммарное содержание главных ионов практически каждый год отмечалось

Таблица 1. Ионный состав и суммарное содержание основных ионов в водах притоков оз. Телецкого, мг/дм³, по данным за 2016–2020 гг.

Характеристика / ионы	Диапазон	Среднее	Ошибка средней	Коэффициент вариации
Восточные притоки				
р. Камга				
HCO ₃ ⁻	39.6 – 61.0	49.4	2.5	17
Cl ⁻	1.4 – 4.2	2.1	0.3	45
SO ₄ ²⁻	3.1 – 8.7	5.3	0.6 0.5	34
Ca ²⁺	8.0 – 16.0	13.0	0.5	13
Mg ²⁺	2.4 – 4.8	3.1	0.3	31
Na ⁺ +K ⁺	0.5 – 3.1	1.7	0.2	49
Σ	62.8 – 88.8	74.9	2.9	13
р. Корбу				
HCO ₃ ⁻	9.2 – 18.3	13.1	1.5 1.1	27
Cl ⁻	2.1 – 4.9	3.0	0.4	38
SO ₄ ²⁻	3.1 – 7.3	4.4	0.4	30
Ca ²⁺	1.2 – 4.0	2.6	0.4	45
Mg ²⁺	0.5 – 1.2	1.1	0.2	48
Na ⁺ +K ⁺	2.4 – 6.5	3.8	0.5	43
Σ	22.0 – 34.2	28.1	1.5	15
р. Кокши				
HCO ₃ ⁻	6.1 – 18.3	13.2	1.4	36
Cl ⁻	0.7 – 4.2	2.0	0.4	63
SO ₄ ²⁻	3.1 – 9.1	5.0	0.5	35
Ca ²⁺	2.0 – 5.0	3.3	0.3	32
Mg ²⁺	1.2 – 2.4	1.7	0.2	31
Na ⁺ +K ⁺	1.1 – 1.9	1.6	0.1	18
Σ	18.6 – 34.1	26.8	1.8	22
р. Челюш				
HCO ₃ ⁻	12.2 – 24.4	19.4	1.3	22
Cl ⁻	0.4 – 3.5	1.6	0.3	64
SO ₄ ²⁻	3.1 – 6.4	4.5	0.3	24
Ca ²⁺	3.0 – 6.0	4.6	0.3	21
Mg ²⁺	1.0 – 3.6	1.9	0.2	34
Na ⁺ +K ⁺	0.9 – 2.2	1.6	0.1	27
Σ	22.0 – 42.1	33.5	1.5	15
р. Кыга				
HCO ₃ ⁻	42.7 – 64.1	58.4	3.5	15
Cl ⁻	2.1 – 6.0	3.5	0.6	46
SO ₄ ²⁻	3.1 – 9.1	5.6	0.9	42
Ca ²⁺	12.0 – 20.0	17.4	1.2	19
Mg ²⁺	2.4 – 4.2	2.9	0.3	29
Na ⁺ +K ⁺	1.1 – 2.8	1.7	0.3	42
Σ	65.1 – 104.6	89.5	5.7	17
р. Чири				
HCO ₃ ⁻	30.1 – 42.7	37.6	2.4	16
Cl ⁻	1.4 – 3.5	2.3	0.4	42
SO ₄ ²⁻	3.1 – 5.3	3.9	0.4	20
Ca ²⁺	8.0 – 13.2	11.1	0.9	20
Mg ²⁺	1.2 – 4.8	2.0	0.4	53
Na ⁺ +K ⁺	0.5 – 1.5	1.1	0.2	45
Σ	39.0 – 65.5	56.7	5.0	22

Таблица 1. Продолжение

Характеристика / ионы	Диапазон	Среднее	Ошибка средней	Коэффициент вариации
Восточные притоки				
р. Верхний Камелик				
HCO ₃ ⁻	61.0 – 103.7	81.7	4.1	16
Cl ⁻	1.4 – 3.5	2.6	0.4	54
SO ₄ ²⁻	9.7 – 12.5	10.7	0.3	9
Ca ²⁺	12.0 – 32.0	24.7	2.3	29
Mg ²⁺	4.8 – 7.2	6.4	0.4	22
Na ⁺ +K ⁺	0.9 – 2.2	1.5	0.3	49
Σ	93.6 – 160.0	128.1	6.4	16
Западные притоки				
р. Колдор				
HCO ₃ ⁻	67.1 – 91.5	79.3	4.0	12
Cl ⁻	0.7 – 1.4	1.1	0.1	24
SO ₄ ²⁻	5.1 – 7.2	5.8	0.4	15
Ca ²⁺	20.0 – 24.0	21.7	0.8	9
Mg ²⁺	2.4 – 3.6	3.2	0.3	19
Na ⁺ +K ⁺	1.8 – 3.4	2.4	0.2	26
Σ	99.6 – 129.2	113.5	5.2	11
р. Самыш				
HCO ₃ ⁻	58.0 – 97.6	77.1	5.0	17
Cl ⁻	1.8 – 4.2	3.0	0.3	43
SO ₄ ²⁻	4.6 – 9.6	6.9	1.0	37
Ca ²⁺	16.0 – 30.0	21.7	1.8	22
Mg ²⁺	3.6 – 4.8	3.7	0.1	7
Na ⁺ +K ⁺	0.5 – 3.2	2.0	0.3	42
Σ	87.0 – 148.9	114.8	7.0	16
р. Чедор				
HCO ₃ ⁻	54.9 – 73.2	62.4	2.8	13
Cl ⁻	2.8 – 4.9	4.6 3.9	0.3	19
SO ₄ ²⁻	6.1 – 11.0	8.3	0.6	21
Ca ²⁺	16.0 – 22.0	19.5	0.7	11
Mg ²⁺	2.4 – 4.8	3.3	0.3	25
Na ⁺ +K ⁺	0.5 – 2.5	1.4	0.2	42
Σ	87.2 – 112.7	98.5	3.4	10
р. Малые Чили				
HCO ₃ ⁻	42.7 – 67.9	52.4	2.7	17
Cl ⁻	0.7 – 4.2	2.2	0.3	48
SO ₄ ²⁻	3.1 – 7.2	4.2	0.5	39
Ca ²⁺	8.0 – 18.0	14.0	0.9	21
Mg ²⁺	1.2 – 4.8	2.7	0.4	48
Na ⁺ +K ⁺	0.5 – 2.8	1.7	0.2	48
Σ	71.5 – 100.3	77.3	4.0	17
р. Большие Чили				
HCO ₃ ⁻	48.8 – 70.2	60.4	2.2	12
Cl ⁻	1.1 – 4.9	2.1	0.4	59
SO ₄ ²⁻	3.5 – 6.8	4.8	0.4	29
Ca ²⁺	14.0 – 21.0	17.9	0.7	12
Mg ²⁺	1.2 – 3.6	2.3	0.2	33
Na ⁺ +K ⁺	0.6 – 2.1	1.4	0.1	37
Σ	71.5 – 100.3	89.6	2.6	10

Таблица 1. Окончание

Характеристика / ионы	Диапазон	Среднее	Ошибка средней	Коэффициент вариации
Западные притоки				
р. Чулышман				
HCO ₃ ⁻	36.6 – 79.3	59.6	5.4	30
Cl ⁻	2.1 – 6.3	3.2	0.4	39
SO ₄ ²⁻	4.1 – 8.5	6.2	0.6	32
Ca ²⁺	12.0 – 24.0	17.3	1.4	26
Mg ²⁺	1.2 – 4.8	3.2	0.5	49
Na ⁺ +K ⁺	1.0 – 2.9	1.6	0.2	39
Σ	57.2 – 124.2	91.1	7.9	28
Район пос. Яйлю, озерная вода				
HCO ₃ ⁻	48.8 – 73.2	58.0	2.6	15
Cl ⁻	0.7 – 4.2	2.8	0.5	54
SO ₄ ²⁻	3.1 – 8.2	5.4	0.5	31
Ca ²⁺	14.0 – 20.0	16.5	0.7	13
Mg ²⁺	1.2 – 4.8	2.7	0.3	40
Na ⁺ +K ⁺	1.2 – 3.2	2.0	0.2	34
Σ	75.6 – 106.4	87.5	3.2	12

в малом восточном притоке озера – руч. Верхний (В) Камелик, что объясняется его питанием в основном подземными (трещинными) водами, которые имеют относительно высокую минерализацию [12].

Сравнительно высокое общее содержание главных ионов отмечено в водах рек северной (широтной) части озера – в р. Самыш (до 148.9 мг/л осенью 2018 г.) и р. Колдор (до 129.5 мг/л осенью 2019 г.). В 2009 г. в этих притоках также было установлено наибольшее общее содержание главных ионов (114 мг/л – в р. Колдор и 104 мг/л – в р. Самыш) [8].

Есть мнение, что в воде оз. Телецкого содержание порообразующих элементов кальция, магния и натрия выше в южной части озера, чем в северной меридиональной и субширотной его частях [23]. Однако такая же латеральная зональность распределения показателей ионного состава вод притоков озера авторами статьи не была установлена. Содержание главных ионов в водах притоков северной (широтной) части озера (в реках Колдор и Самыш) с более залесенными территориями водосборов [13, 19] выше, чем в притоках южной (меридиональной) части озера, возможно, это связано с вырубками кедровых лесов в бассейнах рек северной части озера, приводящими к эрози-

онным процессам в горно-лесных почвах и к усилению выноса химических веществ и соединений при большем (чем в южной части озера) количестве осадков.

Реки западных и восточных берегов меридиональной части озера существенно различаются по уровню общей минерализации их вод. На графиках (рис. 2) приведено суммарное содержание солей в симметрично протекающих “парных” реках: Чедор (левый приток) и Корбу (правый приток), Малые Чили (слева) и Кокши (справа), Большие Чили (слева) и Челюш (справа) – за один гидрологический период. Более насыщены главными ионами воды западных притоков, дренирующих в основном берега со зрелыми и сформированными горно-лесными почвами на мощных рыхлых отложениях. В водосборных бассейнах восточных притоков в большей степени представлены скалистые склоны и участки с примитивными каменистыми почвами, поэтому уровень общей минерализации вод восточных притоков заметно ниже.

Различия между западными и восточными притоками по содержанию в их водах главных ионов, возможно, не только следствие различных биогеохимических процессов на водосборах, но и результат нарастающего антропогенного воздействия со стороны туристических

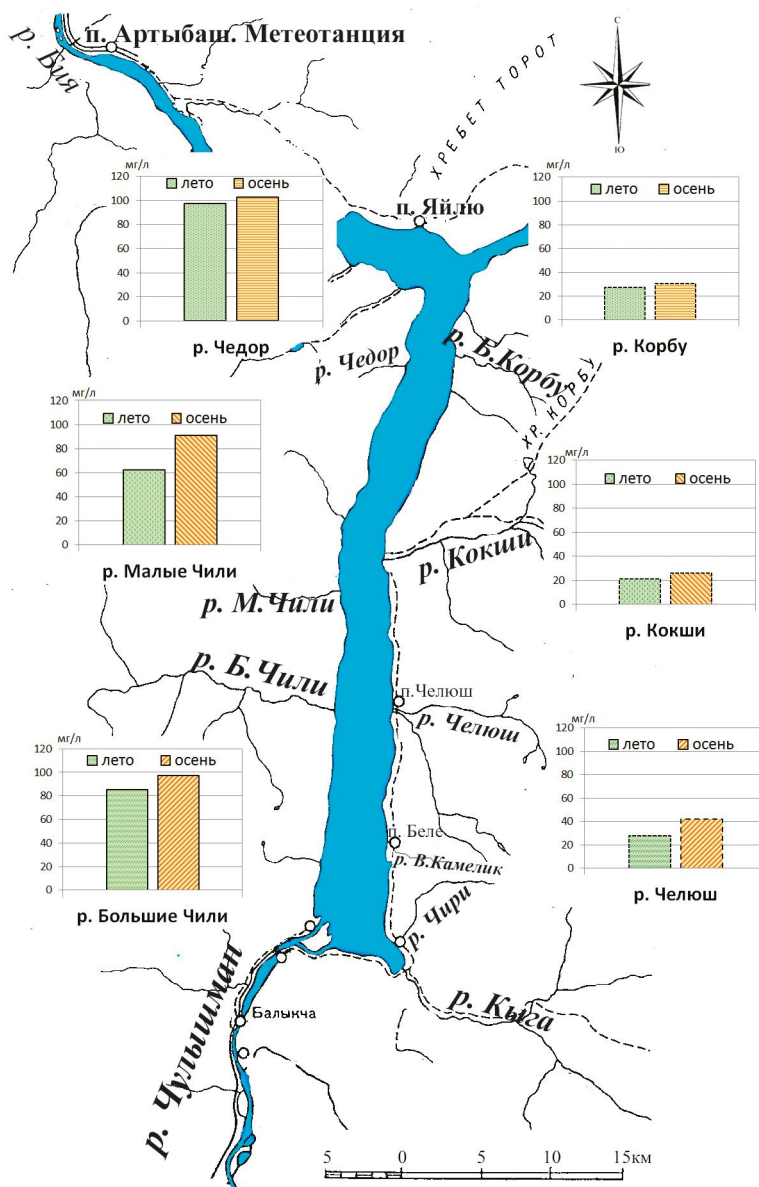


Рис. 2. Общая минерализация (мг/л) вод противоположных притоков западного и восточного берегов меридиональной части оз. Телецкого в различные гидрологические периоды (весенне-летнего половодья и осенней межени) 2018 г.

объектов на природную среду на западном берегу озера, в устьях рек Большие Чили и Малые Чили.

Сезонная динамика общей минерализации вод изученных притоков озера в многолетнем аспекте выражена довольно отчетливо и соответствует внутригодовому изменению водности — в период весенне-летнего половодья общее содержание главных ионов в водах снижено за счет притока талых ледниковых вод, а в период осенней межени, когда в химический

состав поверхностных вод вносят вклад грунтовые воды, содержание главных ионов заметно выше (рис. 3).

Считается, что, если различия концентраций главных ионов в поверхностных водах изменчивы в многолетнем плане, это указывает на преобладание влияния кратковременных факторов формирования ионного стока (гидрометеорологических условий) над долговременными (состав донных отложений и слагающих речную долину горных пород и почв) [16]. В притоках оз. Те-

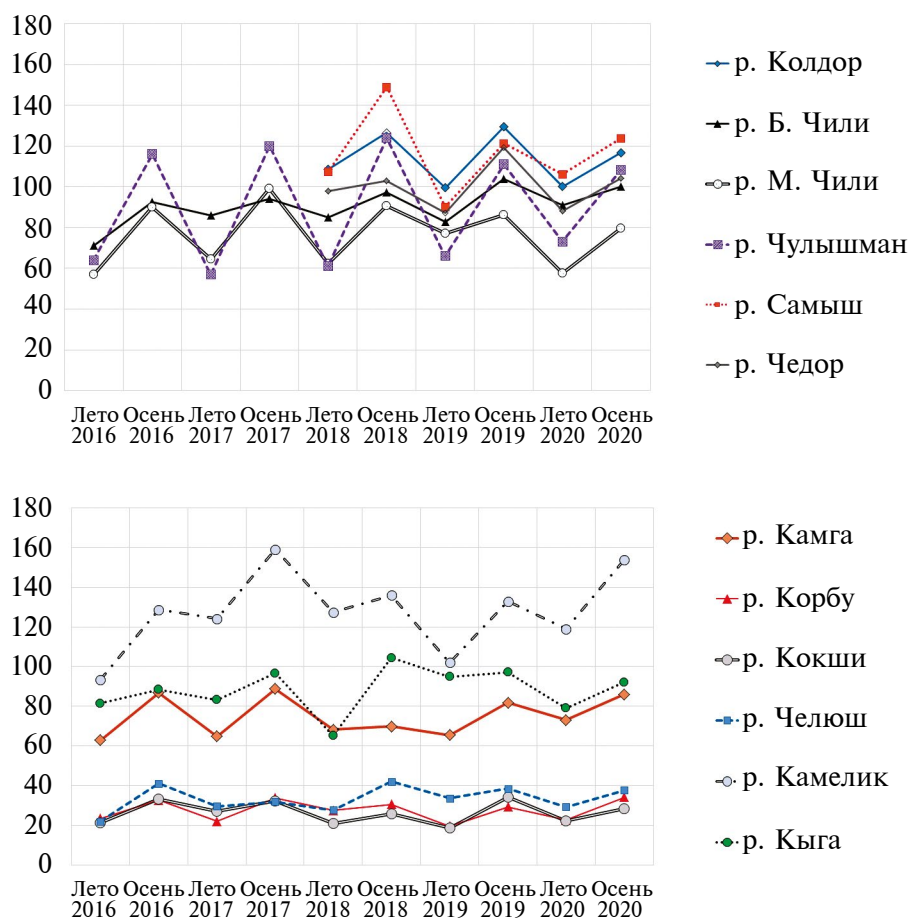


Рис. 3. Многолетняя сезонная динамика общей минерализации вод западных (верхний график) и восточных (нижний график) притоков оз. Телецкого, мг/л.

лецкого содержание главных ионов в течение рассматриваемого периода в целом стабильно: значит, роль пород и почв в формировании ионного состава поверхностных вод может быть существенна.

В табл. 2 приведены результаты расчетов вклада главных ионов, поступивших с атмосферными осадками, в их содержание в поверхностных водах (для рек Кокши, Чири, Чулышман) исходя из средневзвешенных концентраций гидрокарбонатов в атмосферных осадках 6.4 мг/л, хлоридов 0.27, сульфатов 3.5, кальция 0.38, магния 0.23, натрия и калия 0.04 мг/л при общей минерализации осадков 10.6 мг/л. Из исследованных компонентов только вклад атмосферного поступления сульфатов (32–46%) в их концентрацию в поверхностных водах сопоставим с долей участия почв, грунтов и подземных вод. Роль атмосферы в формировании гидрохимического стока

остальных главных ионов (за исключением гидрокарбонатов в воде р. Кокши) незначительна (табл. 2).

Известно, что концентрации и соотношения нативных компонентов в природных водах, их сезонные колебания существенно не меняются в течение большей части года и не зависят от стока [21, 25, 27], за исключением экстремальных ситуаций [27]; тогда как содержания веществ, имеющих частично антропогенное происхождение, в период открытого русла реки могут существенно колебаться [21, 25]. Величины коэффициентов вариации содержаний гидрокарбонатов и кальция в водах большинства притоков оз. Телецкого (кроме рек Кокши и Корбу) наименьшие (табл. 1), что подтверждает природные источники поступления этих ионов в воды. При этом содержание хлорид-иона в притоках оз. Телецкого варьи-

Таблица 2. Вклад атмосферных выпадений в концентрацию основных ионов в водах притоков оз. Телецкого, мг/л

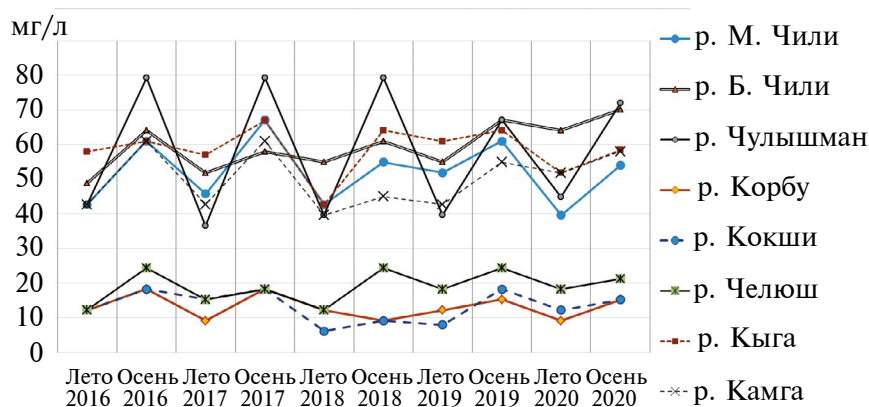
Параметр	Количество осадков, мм	Концентрация ионов, поступивших из атмосферы в реки, мг/л	Вклад атмосферных выпадений в концентрацию, %
р. Кокши			
HCO ₃ ⁻	1480	2.9	22
Cl ⁻		0.12	3
SO ₄ ²⁻		1.6	32
Ca ²⁺		0.17	5
Mg ²⁺		0.10	6
Na ⁺ +K ⁺		0.02	1
р. Чири			
HCO ₃ ⁻	900	3.2	9
Cl ⁻		0.14	6
SO ₄ ²⁻		1.8	46
Ca ²⁺		0.19	2
Mg ²⁺		0.12	6
Na ⁺ +K ⁺		0.02	2
р. Чулышман			
HCO ₃ ⁻	720	4.7	8
Cl ⁻		0.2	6
SO ₄ ²⁻		2.6	42
Ca ²⁺		0.28	2
Mg ²⁺		0.17	5
Na ⁺ +K ⁺		0.03	2

рует наиболее существенно, что, возможно, указывает на его частично “неконсервативное” [21] происхождение.

По классификации О.С. Алекина, воды притоков оз. Телецкого, как правило, относятся к классу гидрокарбонатных, группе кальциевых вод. На долю гидрокарбонатов приходится обычно от 62 до 90% общего (мг-экв/л) содержания анионов. В водах восточных притоков меридиональной части — реках Корбу, Кокши — содержание гидро-

карбонат-иона заметно ниже, его доминирование менее выражено: 31–73 %-экв. В период осенней межени, когда наблюдается усиление всех биогеохимических процессов на водосборах, концентрации гидрокарбонатов в водах притоков озера заметно выше, чем в период весенне-летнего половодья, когда питание водотоков происходит преимущественно талыми водами (рис. 4).

Содержание хлоридов в водах притоков оз. Телецкого невысокое, ≤ 6.3 мг/л (табл. 1). Бо-

**Рис. 4.** Сезонные колебания содержания гидрокарбонат-иона в притоках оз. Телецкого.

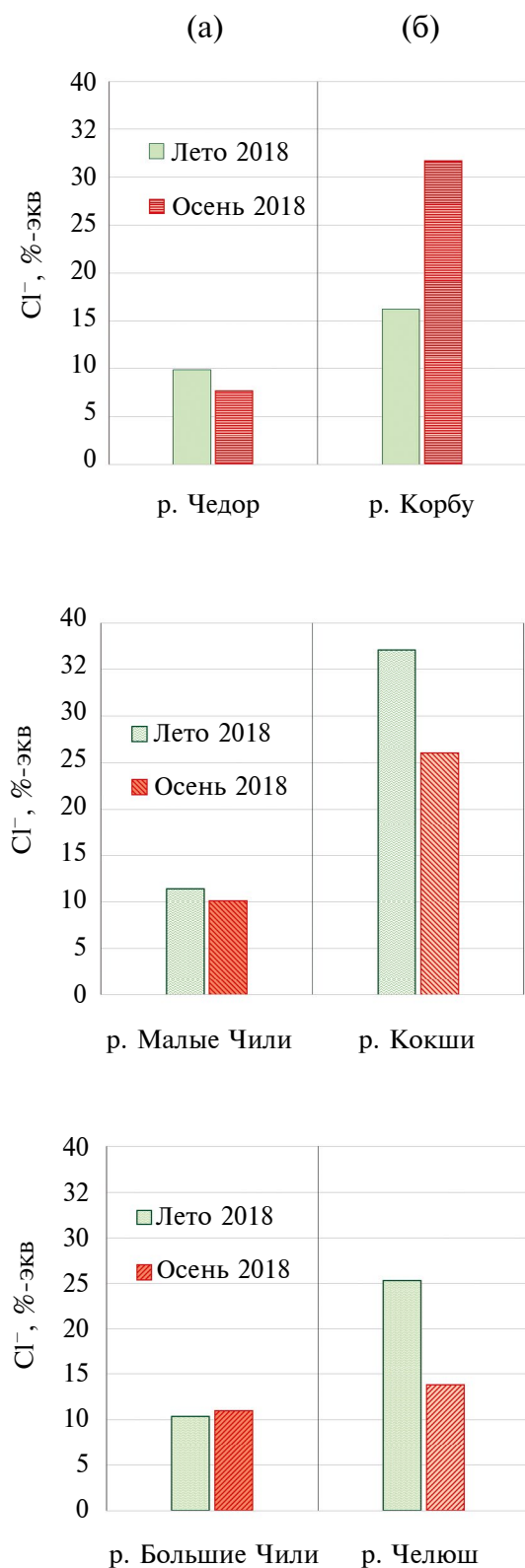


Рис. 5. Относительное (%-экв.) содержание хлоридов в водах левых (западных) (а) и правых (восточных) (б) притоков меридиональной части оз. Телецкого в период летнего половодья (светлые столбики) и осенней межени (столбики со штриховкой) 2018 г.

более высоким содержанием хлоридов отличаются воды рек южной части озера — Чулышман и Кыга, а также Чедор. Установлено, что в водах восточных притоков на долю хлоридов (в общем содержании анионов, мг-экв/л) приходится до 37 %-экв. (в летний период), тогда как в водах западных притоков — ≤ 12 %-экв. На графиках (рис. 5) приведено долевое (в общем содержании анионов, мг-экв/л) содержание хлоридов в водах “парных” рек западных и восточных берегов меридиональной части озера. Значение хлорид-иона в формировании ионной композиции вод восточных притоков определяется его более интенсивным выщелачиванием из горных пород гранитного состава [12]. Высокое содержание хлоридов в водах р. Корбу, возможно, связано и с усиливающимся антропогенным воздействием на природную среду бассейна — водопад в устье реки с каждым годом привлекает внимание все большее количество туристов, для удобства посещения которых здесь сформирована определенная инфраструктура (деревянные лестницы, смотровые площадки, туалет). Как известно, вынос с речными водами ионов натрия, сульфатов, хлоридов связан в том числе с их поступлением с территорий туристических объектов, населенных пунктов, дорог [17].

Содержание сульфатов в водах притоков оз. Телецкого относительно невысокое и за весь изученный период ≤ 13.5 мг/л. Наиболее высокое содержание сульфатов обнаружено в водах руч. В. Камелик — от 9.7 до 12.5 мг/л (12.3–15.7 %-экв.), что объясняется присутствием в горных породах на территории бассейна сульфидов в зоне контакта гранитов и метаморфических сланцев [12] и возможностями их дальнейшего окисления. Высокое содержание сульфатов обнаружено также в водах рек Чедор и Колдор. В течение года содержание сульфатов в водах большинства притоков оз. Телецкого существенно не меняется, за исключением р. Чулышман, содержание сульфатов в которой от лета к осени обычно возрастает в 1.5–2.0 раза. Некоторый рост содержания сульфатов отмечен в последние годы в водах рек Корбу и Кокши — до 7.3 осенью 2018 г. в р. Корбу и до 9.1 мг/л осенью 2019 г. в р. Кокши. Есть мнение, что в тех реках, где сульфаты имеют “неконсервативное” происхождение, повышение их концентрации

на 5–7 мг/л в период открытого русла реки свидетельствует о снижении интенсивности аэробной биогеохимической трансформации [21].

В катионной композиции вод притоков оз. Телецкого, как правило, преобладают кальций и магний. При содержании кальция от 0.6 до 32 мг/л его роль в формировании катионного состава вод, как правило, значительна – 60–85%-экв. Наиболее высоким содержанием кальция отличается руч. В. Камелик, а также крупные притоки северной части озера – реки Колдор и Самыш (табл. 1). Концентрация магния в водах притоков оз. Телецкого невысокая – от 0.5 до 7.2 мг/л. Наибольшее участие магния в формировании катионной композиции вод отмечено в руч. В. Камелик (21–32%-экв.) и в р. Самыш (15–26%-экв.).

Содержание натрия и калия в водах притоков оз. Телецкого в целом невысокое и, как правило, изменяется в пределах от 0.5 до 3.5 мг/л. Повышенным содержанием натрия и калия отличаются воды р. Корбу. В 2018 г. содержание калия в водах р. Корбу, определенное методом атомно-эмиссионной спектроскопии, составляло 6 мг/л, а содержание натрия – 2.9 мг/л. На долю суммарного содержания натрия и калия в водах большинства притоков оз. Телецкого приходится, как правило, 2–11%-экв. общего содержания катионов. Но в воде р. Кокши этот показатель составляет 10–29%-экв., а в р. Корбу – 32–73%-экв.

Считается, что на концентрацию калия в природных водах влияет геологическая структура водосбора и величина стока. Так, в работе [28] показано, что в водосборах, где калий образовался в результате выветривания горных пород, его концентрация в водах рек с увеличением стока снижается из-за процессов растворения, а в водосборах, где калий поступал в воды из верхних горизонтов почв, с увеличением стока его концентрация в водах рек увеличивается. В 2018 г., когда была холодная и влажная осень, а за 4 дня до отбора проб в районе с. Артыбаш шли непрерывные дожди, в крупных западных притоках озера – реках Самыш, Малые Чили и Большие Чили – содержание калия (определенного атомно-эмиссионным методом) было существенно

выше (0.75, 0.71 и 0.35 мг/л), чем в 2019 г., когда была сухая осень (0.28, 0.32 и 0.25 мг/л соответственно). Это позволяет предположить, что поступление калия в воды рек, впадающих в северную часть озера, и в воды западных берегов меридиональной части озера, бассейны которых большей частью представлены горно-лесными ландшафтами с хорошо сформированными горно-лесными бурными и дерново-подзолистыми почвами, происходит преимущественно с поверхностным внутриводосборным стоком. В правобережных восточных притоках с примитивным каменистым почвенным покровом в их бассейнах влажной осенью 2018 г. содержание калия в водах, наоборот, было в два раза меньше (0.48 мг/л в р. Челюш и 0.31 мг/л в р. Кокши), чем в сухую осень 2019 г. (0.8 мг/л и 0.58 мг/л соответственно). Поскольку концентрация калия в реках восточного берега озера с увеличением количества осадков (и стока) снижается, возможно, его поступление в воды этих притоков происходит главным образом за счет выветривания горных пород преимущественно гранитного состава [28], как и предполагали А.М. Малолетко и Т.П. Шестакова [12]. Известно, что средняя концентрация K_2O в гранитном слое земной коры (2.89%) в 1.5 раза выше, чем в осадочной оболочке (1.87%) [7].

В пробах воды самого озера, дважды в год отбираемых у пос. Яйлю, суммарное содержание солей часто выше (75.6–106.4 мг/л), чем в притоках, что объясняется повышенной (125–190 мг/л) минерализацией вод ручьев, впадающих в озеро вблизи поселка, питающихся грунтовыми водами рыхлых отложений высоких озерных террас [12].

В результате многолетних наблюдений за показателями солевого состава вод оз. Телецкого в районе пос. Яйлю установлено, что общая минерализация воды озера находится в прямой зависимости от количества осадков, предшествующих периоду отбора (рис. 6): коэффициент корреляции показателя суммарного содержания солей в воде озера с количеством осадков за 15 дней, предшествующих отбору проб, составляет +0.58. В 2016 и 2019 гг., когда наблюдалось дождливое лето и относительно сухая осень, уровень содержания главных ионов в воде снижался от лета к осени. В 2017 и 2018 гг., когда

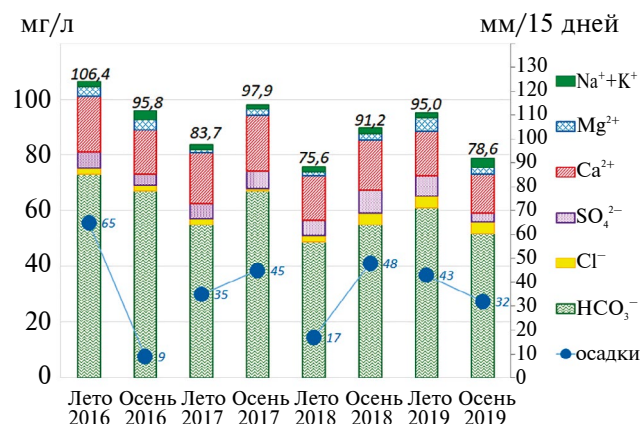


Рис. 6. Сезонная динамика суммарного содержания главных катионов и анионов (с вкладом каждого в показатель общей минерализации) в водах оз. Телецкого в районе пос. Яйлю в зависимости от количества осадков, предшествовавших отбору проб, в период с 2016 по 2019 г.

были сухое лето и дождливая осень, концентрации ионов в водах в осенний период, наоборот, возрастали. Считается, что в период увеличения осадков соленость природных вод снижается из-за процессов растворения, а в засушливый период содержание главных солей в водоемах и водотоках должно возрасть [26]. Однако в воде оз. Телецкого с увеличением количества осадков общая минерализация растет, что свидетельствует о существенном влиянии на ее уровень биогеохимических процессов, происходящих в почвах водосбора. Большое количество осадков способствует растворению солей и вымыванию их из почв [20].

В водах самого оз. Телецкого наиболее существенно меняется по сезонам содержание гидрокарбонатов, а также хлоридов. Нужно отметить, что в последние годы в озере (в акватории вблизи пос. Яйлю) в ионном составе воды выросла доля хлоридов — в континентальных водах — продукта жизнедеятельности животных организмов [7].

К аналитическим данным содержания основных ионов в водах притоков оз. Телецкого и в озерной воде была применена графическая процедура разделения: все показатели (%-экв.) с помощью электронной таблицы в [24] были нанесены на диаграмму Пайпера (рис. 7). Верхняя результирующая часть диаграммы в форме ромба представляет собой матричное преобразование

двух нижних треугольных графиков содержания анионов и катионов отдельно (%-экв.). Диаметры окружностей на результирующей диаграмме пропорциональны сумме солей (мг/л). Большинство точек, соответствующих содержаниям основных анионов и катионов в водах притоков оз. Телецкого (и самого озера) сосредоточены в левом углу результирующей (ромбовидной) части диаграммы: значит, несмотря на существенные различия по показателю общей минерализации, исследуемые реки принадлежат одной гидрогеохимической фации. Притоки оз. Телецкого несут воды бикарбонатно-магниево-кальциевого типа с переменной жесткостью, с явным преобладанием в их химическом составе щелочно-земельных металлов над щелочными и слабыми кислот (угольной кислоты) над сильными кислотами.

Для притоков озера, на которых есть гидрологические посты, на основе величин расхода воды в них [2], данных о площадях водосборов [19], а также полученных аналитических данных рассчитаны показатели водного и ионного стока в 2018 г. для рек Чулышман, Кокши и Чири (табл. 3).

Расчеты позволяют сказать, что величины ионного стока в малом (р. Чири), среднем (р. Кокши) и крупном (р. Чулышман) притоках озера сильно варьируют, напрямую зависят от

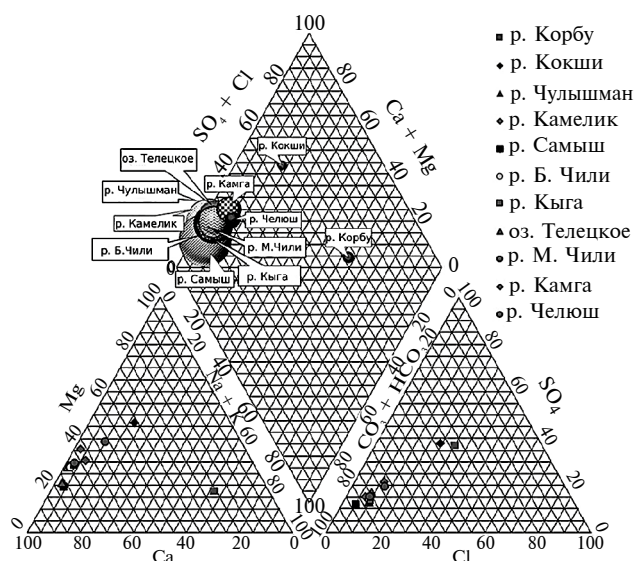


Рис. 7. Относительное (%-экв) содержание основных анионов и катионов в водах притоков оз. Телецкого и в озерной воде в период осенней межени 2018 г. на трилинейной диаграмме Пайпера.

Таблица 3. Гидрологические характеристики и расчетные величины ионного стока в притоках оз. Телецкого с существующими гидрологическими постами (числитель — данные за июнь, знаменатель — за сентябрь 2018 г.)

Характеристики, показатели	р. Чулышман	р. Кокши	р. Чири
Площадь водосбора, км ² [19]	17200	472	37
Средняя высота водосбора, м [19]	2040	1540	1630
Длина реки, км [19]	241	37	11
Уклон реки, % [19]	8,6	18	150
Среднегодовой расход воды, м ³ /с, 2018 г. [2]	175.8	16.2	0.69
Объем стока, км ³ за год	5,5	0,51	0,02
Среднемесячный расход воды м ³ /с	<u>728.0</u>	<u>46.5</u>	<u>2.9</u>
Объем стока, км ³	133.6	22,9	0,59
	<u>1.95</u>	<u>0.125</u>	<u>0.0077</u>
Модуль стока, л/с км ²	0.36	0.061	<u>0.0016</u>
	42.3	<u>98.6</u>	<u>77.2</u>
	7.8	48.1	16.2
Общая минерализация воды, мг/дм ³ ,	<u>65.7</u>	<u>20.9</u>	<u>55.4</u>
	124.2	25.8	65.4
Ионный сток, т/год	364266	10683	1231
Среднемноголетнее поступление из атмосферы на водосбор, т/год	31270	7405	353
Поступление из атмосферы в реки, т/год	43319	2444	116
Доля атмосферного поступления, %	12	23	9.5
Ионный сток, т/мес.	128113	<u>2605</u>	<u>424</u>
	44432	1568	<u>104</u>
Модуль ионного стока, т/ (мес. км ²)	<u>7.4</u>	<u>5.5</u>	<u>11.5</u>
	2.6	3.3	2.8
Модуль ионного стока, т/ (год км ²) 2018 г.	21.2	22.6	32.8

длины реки и площади водосбора и определяются объемом водного стока реки. За один год водами самого крупного притока — р. Чулышман в оз. Телецкое привносится 364 тыс. т основных растворимых солей, из них 219 тыс. т гидрокарбонатов (60%), 77 тыс. т кальция (21%). Для сравнения, с основными притоками Байкала за год в озеро поступает 6 млн т растворимых солей, из них почти 60% также приходится на гидрокарбонаты (3.5 млн т), 14% — на кальций (0.8 млн т) [5]. Среднемноголетний ионный сток бассейна Средней Оби составляет 18–24 млн т/год [17].

Модули ионного стока — количество растворимого вещества, выносимого в единицу времени с единицы площади водосборного бассейна, в разных по величине реках бассейна оз. Телецкого вполне сопоставимы. За год с 1 км² бассейнов притоков выносятся от 21.2 до 32.8 т растворенных солей. Это значительно больше, чем, например, в равнинных реках субарктической зоны тундры с очень слабой химической дену-

дацией (6.8 т с км² в год) [11]. В малой р. Чири модуль ионного стока в 1.5 раза выше, чем в самом крупном притоке озера р. Чулышман, что объясняется сложной структурой водосборного бассейна реки — верховья и среднее течение р. Чулышман (в отличие от р. Чири) заняты не только горно-лесными, но и горно-тундровыми, горно-степными ландшафтами с менее интенсивным, чем в лесных сообществах, биогеохимическим круговоротом. Летом меньше всего растворимых солей выносятся с 1 км² бассейна р. Кокши, зато в период осенней межени модуль ионного стока р. Кокши наибольший (табл. 3).

Из 21.2 т растворенных солей, выносимых с 1 км² бассейна р. Чулышман, 12.8 т приходится на гидрокарбонаты, 1.4 т — на хлориды, 1.6 т — на сульфаты, 4.5 т — на кальций и 0.4 т — на магний. Для сравнения, за год с 1 км² водосборной площади р. Печоры притоками выносятся 20.9–24.4 т гидрокарбонатов, 2.3–5.2 т хлоридов, 3.9–6.8 т сульфатов, 4.3–8.2 т кальция и 1.5–2.3 т магния [6].

Атмосферная составляющая суммарного выноса главных ионов с речными водами самого крупного притока (р. Чулышман) небольшая — 12%, р. Чири — 9.5%. В р. Кокши вклад атмосферных осадков в величину общей минерализации воды заметно больше — 23% (табл. 3), что обусловлено геохимическими особенностями водосбора реки, стекающей с вершины гранитного хребта.

Есть мнение, что интенсивность химической денудации в бассейнах горных рек, сложенных осадочными толщами, легко поддающимися размыву, с высотой увеличивается, а в бассейнах рек, сложенных устойчивыми к денудации вулканогенными породами, уменьшается [1]. По данным авторов настоящей статьи, интенсивность химической денудации в бассейнах притоков оз. Телецкого снижается с увеличением средней высоты водосбора (табл. 3), что указывает на относительную устойчивость к размыву горных пород, слагающих южное и восточное окаймления озера, и существенность вклада в химический состав природных вод других составляющих, в частности процессов выщелачивания элементов из почв и почвообразующих пород.

Химические компоненты в водах притоков оз. Телецкого по уменьшению величины ионного стока образуют следующий ряд: гидрокарбонаты >> кальций > сульфаты > хлориды > магний > натрий, калий.

При среднемноголетней общей минерализации воды самого озера 88 мг/л и общем объеме воды в озере 40 км³ суммарное содержание главных ионов в водоеме составляет 3520 тыс. т. По данным А.М. Малолетко и Т.П. Шестаковой, эта величина составляла 4778 тыс. т [12]. Зная, что с водами р. Чулышман в озеро ежегодно поступает 364 тыс. т водорастворимых солей (почти в 10 раз меньше их общего содержания в озере) и учитывая долю Чулышмана в общем объеме поставляемых в озеро вод (>80%), предполагаем, что полный обмен растворимых химических веществ в озере происходит за 7–8 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общая минерализация вод притоков оз. Телецкого очень низкая, варьирует в пределах

18.6–160.0 мг/л и меняется в зависимости от гидрологического периода, увеличиваясь в период осенней межени по сравнению с периодом весенне-летнего половодья.

Варьирование концентраций хлоридов, возможно, имеющих частично антропогенное происхождение, наиболее существенно, тогда как содержания гидрокарбонатов и кальция в водах притоков оз. Телецкого наиболее постоянны.

Уровень общей минерализации вод в реках северной (широтной) части озера с более залесенными территориями водосборов заметно выше, чем в реках южной части озера, что является в том числе следствием вырубок леса, приводящих к эрозии горно-лесных почв и усиливающих вынос химических веществ.

Существенно различаются как по уровню общей минерализации вод, так и по ионному составу воды противоположных притоков меридиональной части озера. Это отражение разной геохимической ситуации в их водосборах — в анионный состав вод восточных притоков, берущих свое начало на вершине гранитного хребта Корбу, больший вклад вносят хлориды и сульфаты, в них повышено содержание калия и натрия, в ионной композиции вод западных притоков, дренирующих в основном осадочные отложения, доминируют гидрокарбонаты, кальций и магний.

В реках восточных берегов озера, где преобладают каменистые примитивные почвы, с увеличением количества осадков концентрация калия в водах снижается в 1.5 раза, что указывает на его поступление в воды в основном из некарбонатных горных пород. В водах западных рек, дренирующих хорошо сформированные горно-лесные почвы, с увеличением количества осадков и стока концентрация калия увеличивается в 1.5–2.5 раза, что позволяет считать выщелачивание калия из почв его основным источником поступления в поверхностные воды западных берегов озера.

Биогеохимические процессы, происходящие в почвах территории водосбора, существенно влияют на содержания главных солей в водах

оз. Телецкого, о чем свидетельствует увеличение их концентрации в период обильных осадков.

Влияние атмосферы на содержание главных ионов в притоках оз. Телецкого и на их гидрохимический сток (за исключением сульфатов) незначительно.

На основе построенной диаграммы Пайпера установлено, что воды большинства притоков оз. Телецкого принадлежат одной гидрогеохимической фации, являющейся их диагностическим химическим аспектом. Исключение составляют реки Корбу и Кокши, берущие свое начало на гранитном хребте Корбу.

Модуль ионного стока в разных по величине бассейнах оз. Телецкого меняется от 21 до 32 т/год с км². Интенсивность химической денудации с увеличением средней высоты водосбора и уменьшением уклона реки снижается, что указывает на относительную устойчивость к размыву горных пород берегов озера и существенность вклада в химический состав вод процессов выщелачивания главных ионов из почв. Полное обновление главных ионов в водах озера происходит за 7–8 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуев М.А. Химическая денудация на горной территории Азербайджана // Вод. хоз. России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 1. С. 4–16.
2. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). <https://gmvo.skniivh.ru/>
3. Архив погоды в Артыбаше. <https://rp5.ru/ysclid=Issonl8e4p157845187>
4. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Айрис-пресс, 2012. 576 с.
5. Галазий Г.И. Байкал в вопросах и ответах. Иркутск: Восточно-Сибирское кн. изд-во, 1987. 167 с.
6. Даниленко А.О., Решетняк О.С., Косменко Л.С., Кондакова М.Ю. Изменение интенсивности химической денудации на водосборе реки Печоры в условиях нестационарного климата и хозяйственной деятельности // Вода и экология: проблемы и решения. 2020. № 4 (84). С. 38–49.
7. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. М.: Высш. шк., 1998. 413 с.
8. Долматова Л.А. Особенности гидрохимического режима Телецкого озера в период осеннего охлаждения // Мир науки, культуры, образования. 2011. № 6–2 (31). С. 417–423.
9. Ельчиносова О.А., Кузнецова О.В., Рождественская Т.А., Кайзер М.И., Вышникова Т.В. Эколого-биогеохимическая оценка почв горно-лесного пояса бассейна Телецкого озера // Успехи современного естествознания. 2019. № 4. С. 51–56.
10. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая шк., 1990. 351 с.
11. Макаров В.Н., Ноговицын Д.Д., Шеина З.М. Гидрология и ионный сток рек Северо-Востока Якутии // Успехи современного естествознания. 2019. № 8. С. 56–61.
12. Малолетко А.М., Шестакова Т.П. Материалы к гидрохимии бассейна Телецкого озера // Вопросы географии Сибири / Под ред. А.А. Земцова. Томск, 1979. С. 110–126.
13. Маринин А.М., Самойлова Г.С. Физическая география Горного Алтая. Уч. пособие по спецкурсу. Барнаул: БГПИ, 1987. 110 с.
14. Новиков Ю.В., Ласточкина К.О., Болдина З.Н. Методы исследования качества воды водоемов. М., 1990. 397 с.
15. Пузанов А.В., Бабошкина С.В., Горбачев И.В. Содержание и распределение основных макро- и микроэлементов в поверхностных водах Алтая // Вод. ресурсы. 2015. № 3. Т. 42. С. 298–310.
16. Савенко А.В., Бреховских В.Ф., Покровский О.С. Макро- и микроэлементный состав вод дельты Волги и его межгодовая изменчивость // Арид. экосистемы. 2016. Т. 22. № 1 (66). С. 11–19.
17. Савичев О.Г. Ионный сток Средней Оби и ее крупных притоков // Изв. Томского политех. ун-та. 2004. Т. 307. № 6. С. 40–44.
18. Савичев О.Г., Иванов А.О. Атмосферные выпадения в бассейне Средней Оби и их влияние на гидрохимический сток рек // Изв. РАН. Сер. географическая. 2010. № 1. С. 63–70.
19. Селегей В.В., Селегей Т.С. Телецкое озеро / Под ред. В.А. Знаменского. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 142 с.
20. Трофимов С.Я., Караванова Е.И. Жидкая фаза почв: учебное пособие. М.: Университет. кн., 2009. 111 с.
21. Хажеева З.И., Тулохонов А.К., Дашибалова Л.Т. Сезонная и пространственная динамика минерализации и главных ионов реки Селенги // Вод. ресурсы. 2007. Т. 34. № 4. С. 475–480.
22. Черных Д.В., Самойлова, Г.С. Ландшафты Алтая (Республика Алтай и Алтайский край). Карта.

- Масштаб 1 : 500000. Новосибирск: Новосибирская картограф. ф-ка, 2011.
23. Шевченко Г.А. Характер пространственного распределения микроэлементов в воде Телецкого озера (Горный Алтай) // Проблемы регион. экологии. 2010. № 5. С. 90–94.
 24. Carlos E. Molano C. Piper hydrogeochemical diagram. https://sites.google.com/a/hidrogeocol.com.co/carlos_molano/Home
 25. Cartwright I. Concentration vs. streamflow (C-Q) relationships of major ions in south-eastern Australian rivers: Sources and fluxes of inorganic ions and nutrients // Applied Geochem. 2020. V. 120.
 26. Herczeg A.L., Dogramaci S.S., Leaney F.W. Origin of dissolved salts in a large, semi-arid groundwater system: Murray Basin, Australia // Marine Freshwater Resour. 2001. V. 52. P. 41–52.
 27. Hofmann H., Cartwright I., Morgenstern U. Estimating retention potential of headwater catchment using Tritium time series // J. Hydrol. 2018. V. 561. P. 557–572.
 28. Holloway J.M., Dahlgren R.A. Seasonal and event-scale variations in solute chemistry for four Sierra Nevada catchments // J. Hydrol. 2001. V. 250. P. 106–121.
 29. Musolff A., Schmidt C., Selle B., Fleckenstein J.H. Catchment controls on solute export // Advances Water Resour. 2015. V 86. P. 133–146.
 30. Siwek J.P., Zelazny M., Chelmicki W. Influence of Catchment Characteristics and Flood Type on Relationship Between Streamwater Chemistry and Streamflow: Case Study from Carpathian Foothills in Poland // Water Air And Soil Pollution. 2011. № 214. P. 547–563.
 40. Taboada-Castro M.M., Rodriguez-Blanco M.L., Taboada-Castro M.T. Assessing the Influence of Catchment Land-Use Patterns on the Nutrients and Major Ions Chemistry of Drainage Water // Communications In Soil Science And Plant Analysis. 2013. V. 44 Is. 1–4. P. 422–428.